PROF. DR.-ING. KARL HUMBURG

DIE GLEICHSTROMMASCHINE

II.

SAMMLUNG GÖSCHEN

BAND 881

SAMMLUNG GÖSCHEN BAND 881

DIE GLEICHSTROMMASCHINE

von

DR.-ING. KARL HUMBURG
Professor an der Technischen Hochschule Hannover

II. Band

Mit 38 Abbildungen

Zweite, durchgesehene Auflage

WALTER DE GRUYTER & CO.
vormals G. J. Göschen'sche Verlagshandlung · J. Guttentag,
Verlagsbuchhandlung · Georg Reimer · Karl J. Trübner · Veit & Comp.

BERLIN 1956

Alle Rechte, einschl. der Rechte der Herstellung von Photokopien und Mikrofilmen, von der Verlagshandlung vorbehalten

©

Copyright 1956 by Walter de Gruyter & Co.,
Berlin W 35, Genthiner Str. 13

Archiv-Nr. 11 08 81

Satz und Druck 1/10/14 Walter de Gruyter & Co.
5000/23/56

Printed in Germany

Inhalt des zweiten Bandes

I. Das betriebsmäßige Verhalten der Gleichstrom-Maschine 5
1. Schaltung und Kennlinien von Gleichstrom-Erzeugern 5
a) Gewöhnliche Stromerzeuger 5
b) Stromerzeuger für Sonderzwecke, insbesondere für Lichtbogenschweißung 11
c) Querfeldmaschinen 14
2. Schaltung und Kennlinien von Motoren 20
a) Schaltungen 20
b) Kennlinien 21
c) Anlauf und Drehzahlregelung 26
d) Bremsung 30
II. Verluste und Wirkungsgrad 33
1. Berechnung 33
2. Messung 43
III. Die Erwärmung 50
1. Grenzen der zulässigen Erwärmung 50
2. Messung der Erwärmung 52
3. Berechnung der Erwärmung bei Dauerbetrieb . . . 54
4. Zeitlicher Verlauf der Erwärmung 59
IV. Die Größenbemessung 63
1. Allgemeine Grundsätze 63
2. Die Entwurfsgleichung 64
3. Die Beanspruchungen 69
4. Regeln des Ebenmaßes 72
5. Die Typenreihe 74
V. Berechnungsbeispiel 76
1. Hauptabmessungen 76
2. Der Anker 77
a) Wicklungsschema 77
b) Nutenabmessungen 79
c) Verluste und Erwärmung 81
3. Der Stromwender 84
4. Die Welle 86
5. Die Hauptpole 88
a) Polkerne und Joch 88
b) Magnetische Nachrechnung 91
c) Hauptpolwicklung 93
6. Die Wendepole 96
7. Wirkungsgrad 100
Sachregister für Band I und II 101

Inhalt des ersten Bandes

I. Der Aufbau der Gleichstrommaschine

1. Allgemeines
2. Der Ständer
3. Der Ankerkörper
4. Die Ankerwicklung
5. Der Stromwender
6. Die Bürsten und Bürstenhalter
7. Die tragenden Maschinenteile
8. Die Lüftung

II. Die Ankerwicklung

1. Begriffe und Bezeichnungen
2. Wicklungsregeln
3. Induzierte Spannungen
4. Ausgleichsverbindungen
5. Entwurf einer Gleichstromwicklung
6. Stromdichte und Strombelag

III. Der magnetische Kreis der Hauptpole

1. Die magnetischen Grundgesetze und Einheiten
2. Die Berechnung der Erregung bei Leerlauf
3. Die Berechnung der Erregung bei Belastung
4. Die Kompensationswicklung
5. Die Berechnung der Erregerwicklung

IV. Die Stromwendung

1. Die Dauer der Stromwendung
2. Die Stromwendespannung
3. Die Wendepole
4. Die Stromzeitkurven und die Bürstenspannungskurven
5. Bedingungen für gute Stromwendung
6. Die Dämpfung
7. Die Rückwirkung der Kurzschlußströme auf das Hauptfeld

I. Das betriebsmäßige Verhalten der Gleichstrommaschine

1. Schaltung und Kennlinien von Gleichstrom-Erzeugern

a) Gewöhnliche Stromerzeuger

Die gebräuchlichste Schaltung eines Gleichstrom-Erzeugers ist die mit Nebenschlußerregung (Selbsterregung) nach Bild 1b. Nur in besonderen Fällen wird Fremderregung nach Bild 1a angewendet. Noch seltener ist die Reihenschlußerregung nach Bild 1c. Häufiger wird eine Nebenschlußwicklung mit einer Reihenschlußwicklung („Verbundwicklung") zu einer „Doppelschlußerregung" verbunden (Bild 1d).

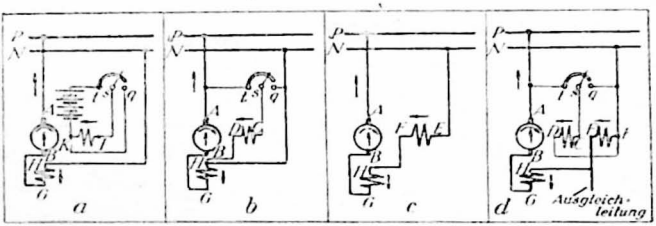

Bild 1. Schaltungen von Gleichstromerzeugern mit Wendepolen.
a Fremderregung. b Nebenschlußerregung. c Reihenschlußerregung.
d Doppelschlußerregung.

Bild 1 zeigt auch die durch VDE-Regeln festgelegte Klemmenbezeichnung: Netz P—N, Anker A—B, Nebenschlußwicklung C—D, Reihenschlußwicklung E—F, Wendepol- oder Kompensationswicklung G—H, fremderregte Wicklung I—K.

In den Kreis der Nebenschlußerregerwicklung wird stets ein Regelwiderstand (Klemmen t und s in Bild 1) einge-

schaltet. Die Nebenschlußwicklung soll aber nie ganz geöffnet werden, weil dabei ihre magnetische Energie einen starken Öffnungsfunken erzeugen würde. Sie wird statt dessen kurzgeschlossen über die Klemme q.

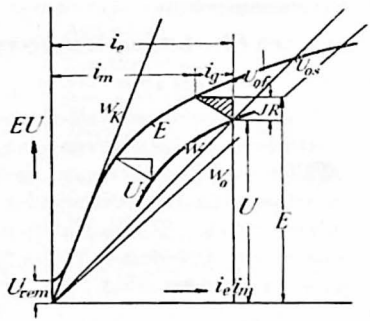

Bild 2. Erregerstrom-Kennlinien.

Das betriebsmäßige Verhalten der Maschinen wird durch Kennlinien dargestellt. Die wichtigsten Kennlinien für Stromerzeuger sind diejenigen, die die Spannung in Abhängigkeit vom Erregerstrom darstellen (Erregerstrom-Kennlinien, Bild 2) oder in Abhängigkeit vom Belastungsstrom (Laststrom-Kennlinien, Bild 3). Die Leerlaufkennlinie (Bd. I, Bild 42) ist in Bild 2 Kurve E nochmals wiedergegeben. Bei Belastung der Maschine ist zur Erregung des gleichen magnetischen Flusses ein höherer Erregerstrom notwendig. Der Unterschied soll als Gegenerregung i_g bezeichnet werden. Auch ist bei Belastung die Klemmenspannung U kleiner als die induzierte Spannung E, und zwar um den Betrag der Ohmschen Spannung $I \cdot R$. (R = Ohmscher Widerstand des Ankers und der mit ihm in Reihe geschalteten Wicklungen einschließlich Übergangswiderstand am Stromwender). Die bei Belastung erforderliche Erregung i_e erhält man also durch Aufzeichnung des „Spannungsabfalldreiecks" mit den Seiten i_g und $I \cdot R$ (Bild 2).

Die Gegenerregung ist nicht einfach dem Strom proportional (s. Bd. I Seite 69). Auch die Ohmsche Spannung $I \cdot R$ ist nicht genau dem Strom proportional, weil sie auch

die Übergangsspannung an den Bürsten enthält (s. Seite 38). Für überschlägige Untersuchungen pflegt man trotzdem anzunehmen, daß das ganze in Bild 2 schraffierte Spannungsabfalldreieck dem Belastungsstrom I proportional ist.

Die Gegenerregung ist auch nicht unabhängig von der Stärke des Hauptfeldes, also von der Erregung. Nur wenn man hiervon absieht, kann man, wie üblich, eine Erregerstromkennlinie für konstante Belastung konstruieren (Kurve U in Bild 2), indem man das Spannungsabfall-Dreieck einfach an der Leerlaufkennlinie entlang verschiebt.

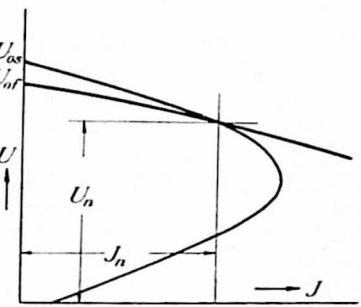

Bild 3. Laststrom-Kennlinien.

Das Spannungsabfall-Dreieck in Bild 2 sei für Nennlast gezeichnet. „Nennlast" ist die Belastung, für die die Maschine bestimmt ist, und die auf dem Leistungsschild genannt ist: „Nennleistung" N_n = „Nennspannung" U_n · „Nennstrom" I_n.

Als „Spannungsänderung" bezeichnet man die Spannungserhöhung bei Übergang von „Nennbetrieb" auf Leerlauf. Sie kann aus den Kennlinien (Bild 2) gefunden werden. Die Spannungsänderung ist bei Selbsterregung (Nebenschlußerregung) wesentlich größer als bei Fremderregung. Bei Fremderregung kann die Leerlaufspannung U_0 aus der Leerlaufkennlinie für i_e = konst. gefunden werden (U_{of}). Bei Selbsterregung wird durch die Zunahme der Klemmenspannung bei Entlastung auch die Erregung vergrößert; die Klemmenspannung wird dadurch noch weiter erhöht. Als konstant zu betrachten ist hier der Widerstand im Erregerstromkreis, also der Quotient

$U : i_e$. Dieser Widerstand ist in Bild 2 durch die Neigung des Strahles W dargestellt, der deshalb als „Widerstandsgerade" bezeichnet wird. Die Leerlaufspannung bei Selbsterregung (U_{os}) ist nun durch den Schnitt der Widerstandsgeraden mit der Leerlaufkennlinie gegeben.

Wenn man die Klemmenspannung der Maschine abhängig von der Belastung (Strom I) bei unverändertem Erregerwiderstand für Fremderregung und für Selbsterregung aufträgt, so erhält man die in Bild 3 gezeichneten Kurven. Beachtenswert ist hier vor allem, daß bei Selbsterregung der Belastungsstrom gar nicht über einen bestimmten Grenzwert hinaus anwachsen kann, und daß bei Kurzschluß (Klemmenspannung $= 0$) der Strom wieder kleiner wird. Bei einer selbsterregten Maschine wird ja im Kurzschluß auch die Erregung $= 0$, der Kurzschlußstrom wird also nur noch durch die remanente Spannung (U_{rem}, Bild 2) getrieben. Bei Fremderregung dagegen ist der Kurzschlußstrom sehr groß, die Spannungsänderung dementsprechend klein.

Durch eine Verbundwicklung kann die Spannungsänderung nach Belieben vergrößert oder verkleinert werden. Eine größere Spannungsänderung ist erwünscht z. B. bei Schweißstromerzeugern oder bei Generatoren, die mit Pufferbatterien zusammenarbeiten sollen. Bei solchen Maschinen wird die Verbundwicklung so geschaltet, daß sie der Nebenschlußwicklung entgegenwirkt.

Eine kleinere Spannungsänderung wird verlangt für Maschinen, die ohne selbsttätigen Spannungsregler ein Netz mit konstanter Spannung speisen sollen. In diesem Fall muß die Verbundwicklung so geschaltet sein, daß sie die Nebenschlußwicklung unterstützt. Maschinen mit feldverstärkenderVerbundwicklung arbeiten schlecht parallel. Ein gutes Parallelarbeiten wird ermöglicht durch eine Ausgleichsleitung (Bild 1d), welche die Verbundwicklungen allein miteinander parallel schaltet.

Wenn man bei einer selbsterregten Maschine den Widerstand des Erregerstromkreises verkleinert, so kann man die Leerlaufspannung erhöhen. Hier wird aber bald eine Grenze erreicht, sobald nämlich der Vorwiderstand ganz ausgeschaltet und nur noch der Widerstand der Erregerwicklung selbst im Erregerstromkreis enthalten ist (Widerstandsgerade W_0). Vergrößert man den Widerstand des Erregerstromkreises, so kann die Spannung zunächst stetig verkleinert werden. Bald aber, wenn nämlich die Widerstandsgerade die Leerlaufkennlinie berührt (Widerstandsgerade W_k), fällt die Spannung fast plötzlich bis auf einen Wert, der nicht viel größer ist als die remanente Spannung (U_{rem}). Man nennt den Widerstand des Erregerstromkreises, bei dem dieses plötzliche Absinken der Spannung beobachtet wird, den kritischen Widerstand.

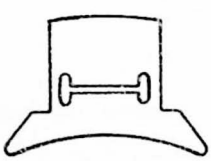

Bild 4. Isthmuspol.

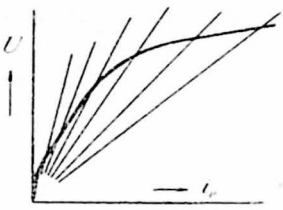

Bild 5. Leerlaufkennlinie einer Maschine mit Isthmuspol.

In manchen Fällen, z. B. bei Erregermaschinen für Drehstromgeneratoren, wird eine stetige Regelung bis zu einer sehr kleinen Spannung verlangt. Die Leerlaufkennlinie muß dann eine solche Form erhalten, daß ihr geradliniger Teil nicht mehr durch den Nullpunkt geht. Man erreicht dies, indem man parallel zu einem Luftspalt einen schmalen Eisensteg („Isthmus") anbringt, etwa nach Bild 4, der schon bei geringer Spannung gesättigt ist. Die Leerlaufkennlinie einer solchen Maschine zeigt Bild 5. Hier hat jede der eingezeichneten

Widerstandsgeraden einen wohldefinierten Schnittpunkt mit der Leerlaufkennlinie.

Die Leerlaufkennlinie E gilt für eine bestimmte Drehzahl. Bei kleinerer Drehzahl liegt sie niedriger. Ändert man mit der Drehzahl den Maßstab so, daß die Leerlaufkennlinie immer dieselbe bleibt, dann ändert sich die Neigung der Widerstandsgeraden umgekehrt proportional mit der Drehzahl. Bei einer bestimmten Drehzahl, die um so niedriger liegt, je geringer der Widerstand im Erregerstromkreis ist, kommt die Widerstandsgerade in die kritische Lage W_k. Man nennt diese Drehzahl die kritische Drehzahl. Unterhalb der kritischen Drehzahl ist die Maschine nicht imstande, sich selbst zu erregen; d. h. die Spannung steigt nicht wesentlich über die remanente Spannung.

Wenn man bei gleichbleibender Drehrichtung einer selbsterregten Maschine die Erregerwicklung umpolt (die Klemmen C und D in Bild 1b vertauscht), dann erregt sich die Maschine nicht. Die remanente Spannung erzeugt vielmehr dann in der Erregerwicklung einen Strom, der den remanenten magnetischen Fluß schwächt („Totschaltung"). Eine Umkehr der Spannungsrichtung (Umpolung) der selbsterregten Maschine ist also auf diese Art nicht zu erreichen. Um die Maschine umzupolen, muß man vielmehr durch einen Erregerstromstoß aus fremder Stromquelle die Richtung des remanenten Flusses ändern. Wird dann die Selbsterregung wieder eingeschaltet, dann erregt sich die Maschine von selbst trotz unveränderter Schaltung und Drehrichtung auf eine Spannung von entgegengesetzter Richtung.

Bei manchen Anwendungen (z. B. bei der Lichtbogenschweißung) kann ein unbeabsichtigtes Umpolen vorkommen, wenn z. B. nach einem Kurzschluß der Erregerstrom rascher verschwindet als der Kurzschlußstrom im Ankerstromkreis. Dieses Umpolen ist sehr unerwünscht; deshalb vermeidet man hier die reine Selbsterregung.

b) Stromerzeuger für Sonderzwecke, insbesondere für Lichtbogenschweißung

Unter den Stromerzeugern, die für irgendwelche Sonderzwecke in außergewöhnlicher Bauart hergestellt oder in außergewöhnlicher Schaltung verwendet werden, sind die Schweißstromerzeuger die wichtigsten. Man verlangt von ihnen vor allem einen kleinen Kurzschlußstrom I_k, der den Arbeitsstrom I_a nur wenig überschreiten darf. Kurzschlüsse kommen ja beim Schweißen betriebsmäßig vor, wenn nämlich die Schweißelektrode mit dem Werkstück in Berührung gebracht wird, um den Lichtbogen entstehen zu lassen, oder wenn ein Tropfen von der Elektrode zum Werkstück übergeht. Auch muß der Arbeitsstrom und mit ihm der Kurzschlußstrom regelbar sein, weil der beim Schweißen benötigte Strom von der Stärke der zu verbindenden Werkstücke und vom Elektrodendurchmesser abhängig ist. Ferner muß der Schweißstromerzeuger eine „Zündspannung" von etwa 70 V liefern können, obwohl die Lichtbogenspannung (Arbeitsspannung U_a) nur etwa den dritten Teil hiervon, nämlich 20—25 V beträgt.

Man erfüllt diese Forderungen am einfachsten dadurch, daß man den Schweißstromerzeuger für eine konstante Spannung U_0 von etwa 70 V auslegt, und in den Schweißstromkreis veränderliche Widerstände, je nach der gewünschten Arbeitsstromstärke, einschaltet. Bild 6 zeigt die Laststromkennlinien einer solchen Anlage. Man erhält aber dabei einen sehr schlechten Wirkungsgrad; denn von der erzeugten Spannung werden immer zwei Drittel in den Widerständen vernichtet. Deshalb wird dieses Verfahren nur bei Mehrstellen-Schweißanlagen angewendet. Hier braucht man einen Erzeuger konstanter Spannung, damit die verschiedenen Schweißstellen sich gegenseitig nicht stören.

Wenn ein Stromerzeuger nur eine Schweißstelle speisen soll, kann man ähnliche Laststromkennlinien (Bild 7) bei einer fremderregten Maschine durch eine starke Gegenverbund-

wicklung erreichen. Durch einen Nebenwiderstand zur Gegenverbundwicklung, der einen kleineren oder größeren Teil des Arbeitsstromes an dieser Wicklung vorbeileitet, kann auch hier die Arbeitsstromstärke in weiten Grenzen verändert werden.

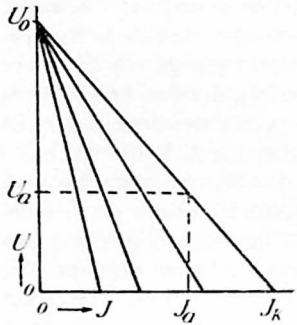

Bild 6. Laststromkennlinien einer Mehrstellenschweißanlage mit Regelwiderstand.

Noch ein wenig günstigere Laststromkennlinien gibt die Maschine für konstanten Strom nach Krämer, deren Verhalten an Hand der Erregerstromkennlinien (Bild 8) erklärt werden soll. Diese Maschine trägt neben einer fremderregten Wicklung und einer Gegenverbundwicklung noch eine selbsterregte (Nebenschluß-)Wicklung, deren Widerstand ungefähr der kritische (s. S. 9) ist. In einem weiten Spannungsbereich

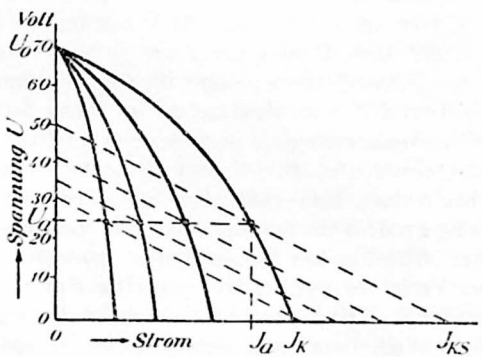

Bild 7. Laststromkennlinien einer Gegenverbundmaschine.
— Standkennlinien — — Stoßkennlinien.

liefert deshalb die selbsterregte Wicklung allein gerade die zur Felderregung notwendigen Amperewindungen ($AW_s =$

AW_m). Die konstanten Amperewindungen der fremderregten Wicklung (AW_f) werden aufgehoben durch die Amperewindungen der Gegenverbundwicklung (AW_g), die demnach ebenfalls angenähert konstant sein müssen. Diese Maschine liefert daher in einem weiten Spannungsbereich einen konstanten Strom.

Bei der Lichtbogenschweißung ändert sich die erforderliche Lichtbogenspannung sehr häufig und sehr rasch. Der

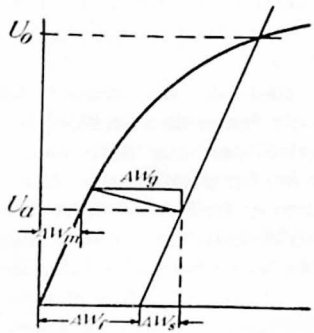

Bild 8. Erregerstromkennlinie der Krämer-Maschine.

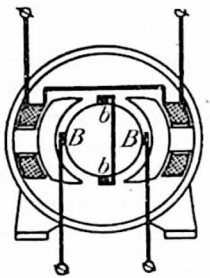

Bild 9. Querfeld-Maschine nach Rosenberg mit Fremderregung.

magnetische Fluß des Stromerzeugers kann wegen seiner Trägheit (m. a. W. wegen der Selbstinduktivität der mit ihm verketteten Wicklungen) nicht ebenso rasch folgen. Wenn z.B. bei der fremderregten Maschine mit Gegenverbundwicklung der äußere Stromkreis durch einen Tropfenübergang plötzlich kurzgeschlossen wird, dann bleibt der magnetische Fluß trotz der Gegenamperewindungen der Verbundwicklung zunächst in voller Höhe bestehen. Im Stromkreis der fremderregten Wicklung fließt dann vorübergehend ein starker Ausgleichsstrom, der erst allmählich wieder abklingt. Im Hauptstromkreis wirkt also zunächst noch die volle Spannung. Sie treibt durch den jetzt sehr kleinen Widerstand dieses Stromkreises

einen „Stoßkurzschlußstrom“ (I_{ks} in Bild 7), der viel größer ist als der Dauerkurzschlußstrom I_k. Auch bei anderen plötzlichen Änderungen im Arbeitsstromkreis, z. B. beim Abreißen des Lichtbogens, stellen sich vorübergehend Betriebszustände ein, die keinem Punkte der bisherigen Laststromlinie entsprechen. Verbindet man die Punkte, welche diese vorübergehenden Zustände kennzeichnen, so erhält man eine neue Kennlinie, die man dynamische Kennlinie oder Stoßkennlinie nennt, im Gegensatz zu den bisher betrachteten, nur für Dauerzustände gültigen statischen Kennlinien oder Standkennlinien (Bild 7).

Diese Ausgleichsvorgänge sind für den Schweißbetrieb sehr unerwünscht. Man will weder den großen Stoßkurzschlußstrom noch die niedrige Leerlaufspannung nach der Stoßkennlinie. Man kann nun schon bei der fremderregten Maschine mit Gegenverbundwicklung oder bei der Krämer-Maschine den Stoßkurzschlußstrom stark verkleinern, also die Stoßkennlinie viel steiler verlaufen lassen, wenn man eine Induktivität (Beruhigungsdrossel) in den Lichtbogenstromkreis einschaltet.

Neuere Schweißstromerzeuger haben durchweg besondere Einrichtungen, die den Zweck verfolgen, die Stoßkennlinien möglichst steil verlaufen zu lassen.

c. Querfeldmaschinen

Bild 9 zeigt den Aufbau einer Querfeldmaschine nach Rosenberg. Das von der Hauptpolwicklung erregte magnetische Feld induziert einen Strom in dem kurzgeschlossenen Kreis der Hilfsbürsten (Erregerbürsten) bb. Dieser Strom erregt nun seinerseits ein Querfeld, welches sich durch die außergewöhnlich kräftigen Polschuhe schließt, ohne in den Polkern und das Joch einzutreten. Dieses Querfeld induziert die Arbeitsspannung zwischen den Hauptbürsten (Arbeitsbürsten) BB. Der Strom, der über diese Bürsten in den Arbeitsstromkreis fließt, wirkt magnetisch der Hauptpolwicklung

entgegen. Er kann daher nicht größer werden als es dieser Hauptpolerregung entspricht. Er muß aber auch nahezu diese Größe erreichen, weil in dem kurzgeschlossenen Kreis der Erregerbürsten schon ein geringes Restfeld der Hauptpole einen starken Strom induzieren kann. Wird die Hauptpolwirkung mit konstantem Strom fremderregt, dann ist also auch der Arbeitsstrom nahezu konstant.

In dieser Schaltung ist die Rosenberg-Maschine als Zugbeleuchtungsmaschine (in Verbindung mit einer Akkumulatorenbatterie) verwendet worden. Ihr praktisch konstanter Arbeitsstrom dient dabei nach Abzug des Verbrauchs der Lichtstromkreise zum Laden der Batterie. Der Strom im kurzgeschlossenen Kreis der Erregerbürsten stellt sich so ein, daß die Maschine unabhängig von Drehzahl und Drehrichtung (also von Geschwindigkeit und Fahrtrichtung des Zuges) immer die durch die Batterie aufgezwungene Spannung liefert. Nur bei ganz niedrigen Drehzahlen, insbesondere bei Stillstand, muß die Maschine durch einen Selbstschalter von der Batterie getrennt werden.

In der Bauart nach Rosenberg hat die Querfeldmaschine den Nachteil, daß die Kommutierung unter den Hauptbürsten nicht durch Wendepole verbessert werden kann. Nach dem Vorgang von Pestarini werden deshalb alle Querfeldmaschinen heute so gebaut, daß die Pole des Ständers in je zwei Teilpole zerlegt werden (Bild 10). Die Maschine enthält also jetzt einen zweipoligen (allgemein $2p$-poligen) Anker in einem vierpoligen (allgemein $4p$-poligen) Ständer. Dadurch wird es möglich, für die Hauptbürsten BB, ebenso wie für die Querbürsten bb — Wendepole anzuordnen. Die Erregerwicklung (Steuerwicklung St) muß dann auf den beiden aus einem Hauptpol entstandenen Teilpolen gleichsinnig geschaltet werden. Da die Durchflutung der Erregerwicklung durch den über die Hauptbürsten BB fließenden Ankerstrom beinahe aufgehoben wird, bleibt nur ein geringer

magnetischer Fluß (kurze Pfeile in Bild 10) in Richtung der Längsachse von links nach rechts. Viel stärker wird der magnetische Fluß, der durch den Strom über die kurzgeschlossenen Querbürsten *bb* erregt wird und der bei Rechtsdrehung der Maschine in Bild 10 in der Querachse von oben nach unten verläuft (lange Pfeile). Die Arbeitsweise dieser von Pestarini als Metadyne bezeichneten Maschine ist die gleiche wie die der Rosenberg-Maschine: Sie ist ein Konstant-Strom-Generator.

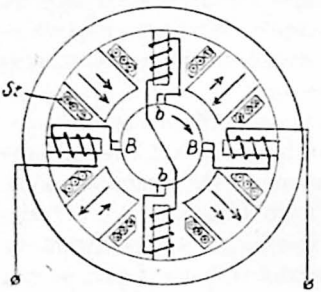

Bild 10. Generator-Metadyne.

Pestarini hat auch einen Konstant-Strom-Umformer angegeben, der bei elektrischen Bahnen angewendet worden ist (Bild 11a). Bei diesem Umformer sind die Querbürsten b_1 und b_2 nicht kurz geschlossen, sondern an ein Netz konstanter Spannung (an den Fahrdraht) angeschlossen. Wendepole sind

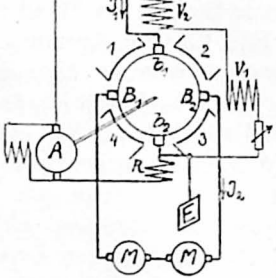

Bild 11a. Umformer-Metadyne.

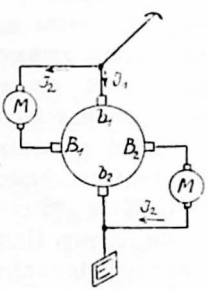

Bild 11b. Umformer-Metadyne in Achter-Schaltung.

natürlich auch hier möglich, aber in Bild 11 zur Vereinfachung nicht gezeichnet. An die Hauptbürsten B_1 B_2 sind die Fahrmotoren M angeschlossen. Fließt ein Strom J_1 von der Fahrleitung durch die Querbürsten b_1 b_2, so entsteht ein magnetischer Fluß in der Achse b_1 b_2, und infolge der Drehung des Umformers, der durch einen kleinen Hilfsmotor A angetrieben wird, eine Spannung zwischen den Hauptbürsten B_1 B_2. Diese Spannung treibt einen Strom durch die Fahrmotoren M und durch den Umformer-Anker über die Bürsten B_1 B_2. Der dadurch erregte magnetische Fluß in der Längsachse induziert wieder eine Spannung zwischen den Querbürsten b_1 b_2. Der Sekundärstrom J_2 wächst so lange an, bis diese Spannung der Fahrdrahtspannung das Gleichgewicht hält. Konstante Spannung im Primärkreis (am Fahrdraht) bedingt also konstanten Strom im Sekundärkreis (in den Fahrmotoren). Dadurch können diese Motoren verlustlos hoch fahren. Wenn beim Anfahren die Spannung in den Fahrmotoren allmählich zunimmt, muß der magnetische Fluß in der Achse der Querbursten b_1 b_2 dementsprechend zunehmen. Da er durch den Strom J_1 erregt wird, entspricht dieser Strom im Primärkreis der Spannung im Sekundärkreis. Das Produkt aus Strom und Spannung ist primär und sekundär dasselbe. Der Umformer entwickelt also kein Drehmoment und benötigt zu seinem Antrieb nur einen kleinen Motor zur Deckung der Verluste.

Wenn man in der Achse der Hauptbürsten B_1 B_2 (Längsachse) eine an das Primärnetz angeschlossene steuerbare Wicklung (Variator-Wicklung, V_1 in Bild 11a) anbringt, so kann man bei gegebener Primärspannung den Sekundärstrom beliebig ändern. Unterstützt die Durchflutung der Variator-Wicklung die des Ankers in der Richtung der Hauptbürsten, dann muß der Sekundärstrom kleiner werden, damit der megnetische Fluß in der Längsachse wieder die Größe annimmt, die der aufgedrückten Primärspannung entspricht. Jetzt ist aber das Leistungsgleichgewicht gestört. Um es

wieder herzustellen, wird auch in der Querachse eine Variator-Wicklung V_2 angebracht, die im gleichen Sinn wirkt wie der Primärstrom J_1 in der Achse der Bürsten b_1 b_2. Natürlich kann der Strom auch in beiden Variator-Wicklungen umgekehrt werden. Dann wird der Sekundärstrom und der Primärstrom vergrößert. Die beiden Variator-Wicklungen können auch zu einer Wicklung vereinigt werden, die schräg zu den Bürstenachsen wirkt, also u. U. nur auf den zwei Teilpolen 1 und 3 angebracht ist. Für den Fall, daß trotzdem noch ein Unterschied zwischen Primär- und Sekundärleistung übrig bleibt, der durch den Antriebsmotor gedeckt werden müßte, hilft eine weitere Wicklung in der Querachse (Regulier-Wicklung R.). Diese wird vom Strom des Antriebsmotors durchflossen und schwächt das Feld in der Querachse, sobald der Antriebsmotor eine zu große Leistung aufnimmt. Dadurch wird eine größere Stromaufnahme vom Netz über die Bürsten b_1 b_2 erzwungen und der Antriebsmotor wird wieder entlastet. Ausgeführte Metadyne-Umformer enthalten noch weitere Hilfswicklungen, die in Bild 11a nicht gezeichnet sind.

Bei voller Drehzahl der Fahrmotoren ist der Strom J_1 ebenso groß wie J_2. Der magnetische Fluß geht in diesem Sonderfall nur noch durch die Pole 1 und 3, die auch schon im Bild 10 stärker waren als die Pole 2 und 4. Die ganze Spannung liegt dann zwischen den Bürsten B_1 und b_1 und zwischen den Bürsten B_2 und b_2, während die Strecken b_1 B_2 und b_2 B_1 spannungslos sind. Der Metadyne-Umformer kann besser ausgenützt werden, wenn man die Verbraucher (die Fahrmotoren) in der sogen. Achterschaltung anschließt (Bild 11b). Dann haben diese Verbraucher die Summe aus der Primärspannung und der Sekundärspannung zur Verfügung. Beim Anfahren der Fahrmotoren, solange die Spannung noch klein ist, wirkt die Spannung des Umformerankers zwischen B_1 und B_2 der Primärspannung und dem Strom J_2 entgegen. Dieser negativen Spannung entspricht ein negativer, d. h.

gegen den Pfeil in Bild 11b gerichteter Primärstrom J_1. Aus der Fahrleitung wird nur ein kleiner Zusatzstrom zur Deckung der Verluste entnommen. Bei halber Drehzahl der Fahrmotoren benötigen diese gerade die Fahrdrahtspannung. Zwischen den Bürsten B_1 und B_2 ist die Spannung Null. Dementsprechend ist auch $J_1 = 0$. Bei voller Drehzahl wirkt die Spannung zwischen B_1 und B_2 im Sinne des Stromes J_2. Der Strom J_1 ist positiv und der Fahrleitung wird die Summe von J_1 und J_2 entnommen. Bei dieser Schaltung wird die Leistung des Umformers nur halb so groß wie bei der Schaltung nach Bild 11a.

Die häufigste Anwendung findet die Querfeldmaschine in der Schaltung als Amplidyne (Bild 12a). Diese unterscheidet

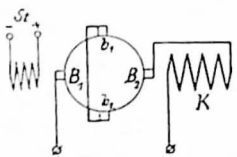

Bild 12a. Amplidyne, Grundschaltung

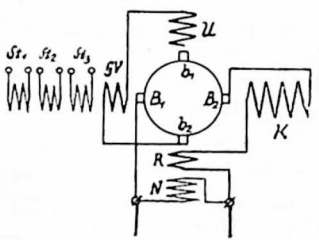

Bild 12b. Amplidyne, erweiterte Schaltung

sich von der Schaltung der Generatormetadyne (Bild 10) nur durch das Hinzukommen der Kompensationswirkung K. Diese Wicklung bewirkt, daß der Ankerstrom in der Längsachse kein magnetisches Feld erregt, daß also das Feld der Steuerwicklung voll erhalten bleibt. Die Querbürsten b_1 b_2 sind auch hier kurz geschlossen, so daß ein sehr schwaches Feld in der Längsachse genügt, um einen beträchtlichen Strom durch die Querbürsten fließen zu lassen. Das starke Querfeld liefert die volle der Windungszahl und der Drehzahl des Ankers entsprechende Spannung zwischen den Hauptbürsten und bei

voller Belastung des Hauptbürstenkreises eine beträchtliche, d. h. die volle normale Leistung der Maschine trotz dem sehr geringen Aufwand an Steuerenergie. Das Verhältnis der Ausgangsleistung zur Steuerleistung wird als Verstärkungsgrad bezeichnet und die ganze Maschine demgemäß als Verstärkermaschine.

Die Schaltung der Amplidyne kann durch eine Reihe von Hilfswicklungen verbessert werden (Bild 12b). Eine Unterstützungswicklung U im Querkreis erhöht die magnetische Wirkung des Stromes J_1 und entlastet dadurch den Anker. Eine Gegenverbund-Wicklung GV im Querkreis begrenzt den Primärstrom. Eine Reihenschluß-Wicklung R im Längskreis wirkt dem Spannungsabfall in diesem Kreis entgegen. Eine Nebenschlußwicklung N im Längskreis erhöht den Verstärkungsfaktor, allerdings auf Kosten der Ansprechgeschwindigkeit. Die Steuerwicklung St ist bei modernen Amplidynen meist mehrfach vorhanden, um Steuerimpulse aus verschiedenen Quellen einführen zu können.

Die Amplidyne wird in der Steuerungstechnik als Erregermaschine für Leonard-Generatoren oder als Hilfs-Erregermaschine für große Drehstromerzeuger verwendet, weil sie trotz der Kleinheit der Steuerenergie auf jede Änderung des Steuerstromes sehr rasch anspricht.

2. Schaltung und Kennlinien von Motoren

a) Schaltungen

Auch für Motoren werden die Schaltungen mit Nebenschlußerregung, Reihenschlußerregung und Doppelschlußerregung verwendet (Bild 13). In den Ankerstromkreis wird im allgemeinen ein Anlaßwiderstand (L—R) eingeschaltet, der den Stromstoß beim Einschalten auf einen zulässigen Wert begrenzt. Die Nebenschluß-Erregerwicklung soll bei ausgeschaltetem Anlasser vom Netz getrennt, aber über den

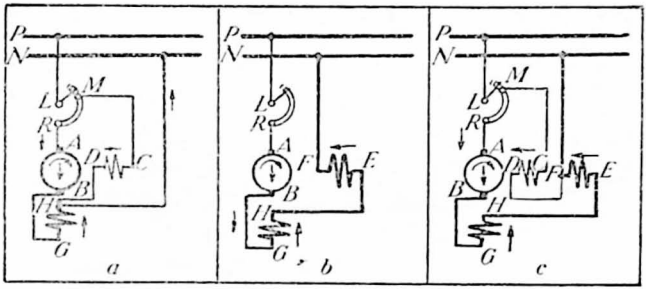

Bild 13. Schaltungen von Gleichstrommotoren mit Wendepolen. a Nebenschlußerregung. b Reihenschlußerregung. c Doppelschlußerregung.

Anker kurzgeschlossen sein; bei eingeschaltetem Anlasser soll sie schon auf der ersten Stufe voll erregt sein. Ihre Anschlußklemme *M* wird deshalb mit der ersten Stufe des Anlaßwiderstandes verbunden. Vorstufen, auf denen der Motor noch nicht anlaufen soll, bleiben dabei außer Betracht.

b) Kennlinien

Von Bedeutung für den Betrieb der Motoren ist vor allem ihr Drehzahlverhalten, d. h. die Abhängigkeit der Drehzahl vom Belastungsdrehmoment, und ihr Drehmomentverhalten, d. h. die Abhängigkeit des Drehmomentes vom Ankerstrom. Beides ist durch die Schaltung bedingt. Bei Nebenschlußmotoren ändert sich die Drehzahl nur wenig mit der Belastung (Nebenschlußverhalten), bei Reihenschlußmotoren steigt die Drehzahl bei Entlastung stark an (Reihenschlußverhalten).

Das von einem Motor entwickelte Drehmoment M[1]) ist proportional dem Ankerstrom I und dem magn. Fluß Φ.

[1]) Wir sprechen hier von dem sogenannten inneren Drehmoment. Das an der Welle nutzbar abgegebene Drehmoment ist um das Reibungsdrehmoment und das Eisenverlust-Drehmoment kleiner.

$$M = c_1 \cdot \Phi \cdot I. \tag{1}$$

Beim Nebenschlußmotor ist der Fluß Φ nur wenig mit dem Belastungsstrom veränderlich; das Drehmoment ist also nahezu proportional dem Strom (Bild 14, Kurve I).

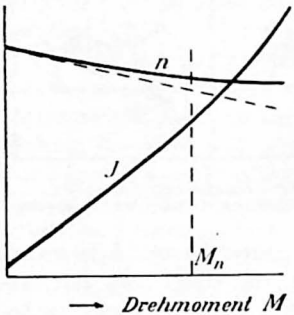

Bild 14. Kennlinien eines Nebenschlußmotors.

Beim Reihenschlußmotor wächst der Fluß mit dem Strom, und zwar bei kleinen Strömen fast proportional, später wegen der Sättigung der Eisenteile nur noch wenig. Das Drehmoment nimmt deshalb im ganzen Bereich stärker als proportional mit dem Strom zu (Bild 15, Kurve I). Dies ist besonders bei Überlastung von Bedeutung. Ein Drehmoment von beispielsweise 150% des Nenndrehmomentes erfordert bei einem Nebenschlußmotor etwa 160—170% des Nennstromes, bei einem Reihenschlußmotor dagegen nur etwa 130—140% des Nennstromes. Die Drehmomentkennlinien nach Bild 14 u. 15 gelten unabhängig von der Drehzahl des Motors, auch schon beim Anlauf; nur durch Änderung der Erregung können sie verändert werden. Für Antriebe, bei denen ein häufiges Anfahren gegen ein starkes Dreh-

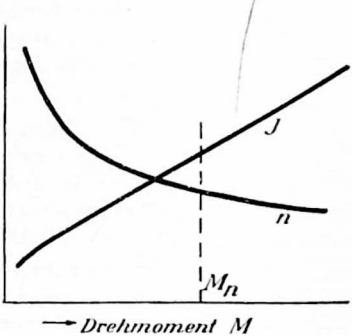

Bild 15. Kennlinien eines Reihenschlußmotors.

moment verlangt wird (Bahnen, Hebezeuge), ist deshalb der Reihenschlußmotor besonders geeignet.

Die Drehzahl stellt sich immer so ein, daß sie gerade ausreicht, um bei dem vorhandenen magnetischen Fluß in der Ankerwicklung eine Spannung E zu induzieren, die gleich der aufgedrückten Klemmenspannung U, vermindert um den Ohmschen Spannungsabfall, ist; $E = U - I \cdot R$. Die induzierte Spannung ist aber[1])

$$E = c_2 \cdot \Phi \cdot n. \tag{2}$$

Also ist

$$n = \frac{U - I \cdot R}{c_2 \cdot \Phi}. \tag{3}$$

Denken wir hier zunächst an den Nebenschlußmotor, so können wir auch schreiben

$$n = n_0 \left(1 - \frac{I \cdot R}{U}\right) \cdot \frac{\Phi_0}{\Phi}. \tag{3a}$$

Hier bedeutet n die Drehzahl der Belastung, n_0 die bei Leerlauf, Φ den magnetischen Fluß bei Belastung, Φ_0 den bei Leerlauf. Φ ist im allgemeinen kleiner als Φ_0; denn auch beim Motorbetrieb wird durch die Sättigung der Polspitzen (Bd. I, S. 70) der Gesamtfluß eines Poles mit wachsendem Strom geschwächt. Ohne den Ohmschen Spannungsabfall würde diese Schwächung des magnetischen Flusses eine Erhöhung der Drehzahl mit wachsender Belastung bedeuten; tatsächlich wird dadurch nur der Drehzahlabfall, der durch die Ohmsche Spannung allein bedingt ist, vermindert. Besonders gilt dies bei großer Belastung. Denn die Schwächung des magnetischen Flusses durch den Ankerstrom ist dem Strom nicht proportional; sie ist bei kleiner Belastung sehr gering, um dann bei

[1]) Die Konstante c_2 in dieser Gleichung unterscheidet sich von der Konstante c_1 in der Drehmomentengleichung (S. 22, Gl. 1) nur durch einen Maßsystemfaktor.

großer Belastung stark anzuwachsen. Die Drehzahlkennlinie (Bild 14, Kurve n) folgt daher nur bei kleiner Last der durch die Ohmsche Spannung allein bedingten Linie $n_0 \cdot \left(1 - \frac{I \cdot R}{U}\right)$, die in Bild 14 gestrichelt eingetragen ist; bei größerer Last verläuft sie immer flacher.

Es kommt sogar vor, besonders bei größeren Motoren und bei Motoren, die zum Zweck der Drehzahlregelung (s. S. 28) mit geschwächtem Feld arbeiten, daß die relative Schwächung des magnetischen Flusses durch den Ankerstrom größer ist als die relative Ohmsche Spannung. Dann steigt die Drehzahl mit wachsender Belastung an. Dies würde einen stabilen Betrieb des Motors unmöglich machen. Denn eine Erhöhung der Drehzahl bei steigendem Drehmoment bedeutet auch umgekehrt eine Erhöhung des vom Motor entwickelten Drehmomentes bei steigender Drehzahl. Wenn nun durch irgendeinen Zufall (z. B. vorübergehend zu hoch gewesene Spannung) die Drehzahl des Motors höher liegt als es der augenblicklichen Belastung entspricht, dann wird er ein zu großes Drehmoment entwickeln, sich dadurch noch weiter beschleunigen, und die Unstimmigkeit wird immer größer werden; d. h. die Drehzahl und mit ihr das Drehmoment und die Stromaufnahme des Motors werden wachsen, bis der Motor durch eine Sicherung oder einen Schalter vom Netz getrennt wird. Eine Drehzahlkennlinie, die mit wachsender Last ansteigt, muß also unbedingt vermieden werden. Man versieht deshalb alle Motoren, bei denen dieses Ansteigen der Drehzahlkennlinie und die dadurch bedingte Unstabilität zu befürchten ist, mit einer schwachen Verbundwicklung (Hilfsverbundwicklung).

Die Gefahr der Unstabilität wird noch erhöht durch ein zu starkes Wendefeld; denn Überkommutierungsströme beim Motor schwächen das Hauptfeld (Bd. I S. 99). Ebenso wird die Gefahr erhöht durch Bürstenverschiebung gegen die Dreh-

richtung; denn dann wirkt der dem Strom proportionale Wendepolfluß wie ein Teil des entgegengesetzten Hauptpolflusses. — Bei Motoren ohne Wendepole dagegen wird die besprochene Unstabilität niemals beobachtet; denn hier führt eine Zunahme der Belastung immer zur Unterkommutierung oder doch zur Verminderung einer vorher etwa bestehenden Überkommutierung und damit zu einer Verstärkung des Hauptpolflusses.

Auch für den Reihenschlußmotor gilt die Gleichung

$$n = \frac{U - I \cdot R}{c_2 \cdot \Phi}. \tag{3}$$

Hier ist aber der Fluß Φ viel stärker von I abhängig als beim Nebenschlußmotor. Bezeichnen wir mit Φ_n den Fluß, der durch den Nennstrom I_n erregt wird, und mit n_n die Nenndrehzahl, dann gilt auch

$$n = n_n \cdot \frac{U - I \cdot R}{U - I_n \cdot R} \cdot \frac{\Phi_n}{\Phi}. \tag{3b}$$

Man kann danach die Drehzahlkennlinien angenähert[1]) konstruieren, wenn man die Leerlaufkennlinie $E = f(I)$ bei einer beliebigen Drehzahl kennt. Denn die induzierte Spannung ist dem Fluß proportional; auch das Verhältnis $\Phi_n : \Phi$ kann also aus der Leerlaufkennlinie entnommen werden: $\Phi_n : \Phi = E_n : E$. Gilt die Leerlaufkennlinie für die Nenndrehzahl n_n, dann ist beim Nennstrom $E_n = U - I_n \cdot R$ und bei einem beliebigen Strom

$$n = n_n \cdot \frac{U - I \cdot R}{E}. \tag{3c}$$

Auf dieser Gleichung beruht die in Bild 16 dargestellte Konstruktion der Drehzahlkennlinie.

[1]) Genau genommen müßte man die Änderung des Flusses durch die Ankerdurchflutung berücksichtigen.

Bei völliger Entlastung (Leerlauf) liegt die Drehzahl eines Reihenschlußmotors meist höher, als es mit Rücksicht auf die mechanische Festigkeit des Ankers zulässig ist. Ein Reihenschlußmotor darf also nie ganz entlastet werden.

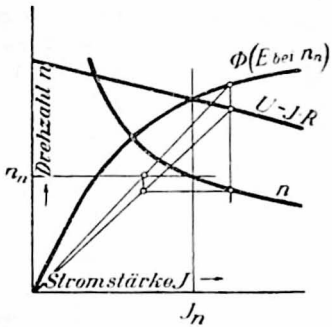

Bild 16. Konstruktion der Drehzahlkennlinie eines Reihenschlußmotors.

Ein Motor mit Doppelschlußerregung hat in jeder Beziehung ein Verhalten, welches zwischen dem des Nebenschlußmotors und dem des Reihenschlußmotors liegt. Oft gibt man einem Nebenschlußmotor eine schwache Verbundwicklung (Reihenschlußwicklung), um seine Drehzahländerung etwas zu vergrößern. Manchmal gibt man auch einem Reihenschlußmotor eine schwache Nebenschlußwicklung, um seine Leerlaufdrehzahl in zulässigen Grenzen zu halten.

c) Anlauf und Drehzahlregelung

Aus der Drehzahlgleichung (3) ist zu entnehmen, daß es drei Möglichkeiten gibt, die Drehzahl eines Gleichstrommotors zu regeln, d. h. willkürlich zu verändern. Man kann nämlich zu diesem Zweck entweder die dem Motor zugeführte Spannung U verändern oder den Widerstand R im Ankerstromkreis des Motors oder den magnetischen Fluß Φ.

Die Drehzahlregelung durch Widerstand im Ankerstromkreis (Hauptstromregelung) ermöglicht nur eine Senkung der Drehzahlkennlinie (Bild 17, Kennlinien *b*). Dabei wird die Drehzahlkennlinie gleichzeitig viel stärker geneigt, denn die im Motor zu induzierende Spannung $E = U - I \cdot R$ ist bei

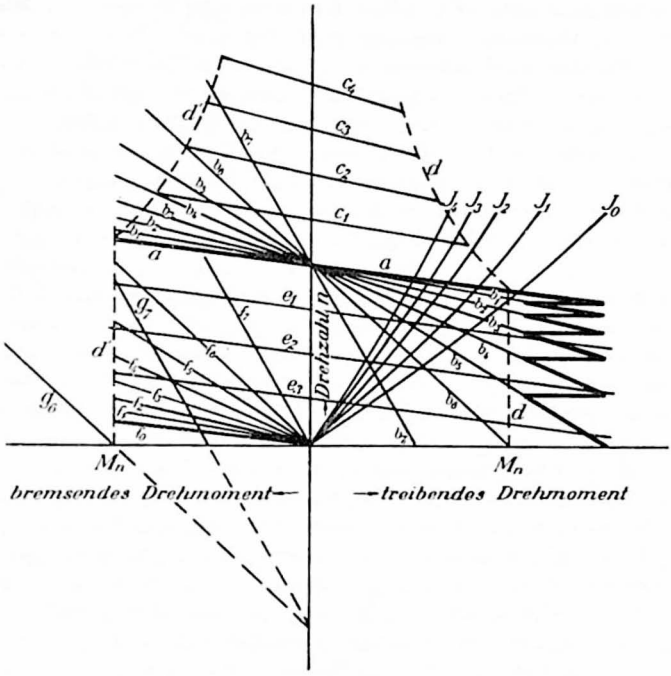

Bild 17. Anlassen, Drehzahlregelung und Bremsen beim Nebenschlußmotor. a: normale Drehzahlkennlinie (bei voller Erregung). b_1—b_7: Drehzahlkennlinien bei Hauptschlußregelung. c_1—c_4: Drehzahlkennlinien bei Nebenschlußregelung. d, d': Belastungsgrenze bei Dauerbetrieb. e_1—e_3: Drehzahlkennlinien bei Leonardschaltung. f_0: Drehzahlkennlinie bei reiner Kurzschlußbremsung. f_1—f_7: Drehzahlkennlinien bei Kurzschlußbremsung mit Widerständen. g_2—g_7: Drehzahlkennlinien bei Gegenstrombremsung.

großem Widerstand nicht nur kleiner, sondern auch entsprechend stärker vom Strom abhängig. Bei Leerlauf muß auch bei großem Vorwiderstand fast die volle Klemmenspannung induziert werden; also stellt sich unabhängig vom Vorwiderstand immer fast dieselbe Leerlaufdrehzahl ein. Das Dreh-

momentverhalten (die Stromkurve in Bild 14 u. 15) bleibt bei der Hauptstromregelung unverändert.

Für dasselbe Drehmoment ist also auch dieselbe Leistung zuzuführen. Da die abgegebene Leistung mit der Drehzahl sinkt, so wird der Wirkungsgrad in demselben Maße schlechter, in welchem die Drehzahl gesenkt wird. Die Hauptstromregelung ist deshalb als Regelung für Dauerbetrieb unbrauchbar, weil unwirtschaftlich. Wohl aber wird sie beim Anlassen der Motoren, also für sehr kurze Zeit, allgemein verwendet. In Bild 17 ist der Verlauf von Drehmoment und Drehzahl während eines Anlaßvorganges als stark ausgezogene Zickzacklinie eingezeichnet. Auch wird die Hauptstromregelung behelfsmäßig, also ebenfalls vorübergehend, in Laboratorien und Prüffeldern oft mit Vorteil angewendet, soweit hier die größere Neigung der Drehzahlkennlinie nicht als Nachteil empfunden wird.

Eine Änderung des magnetischen Flusses wird bei Nebenschlußmotoren durch einen Widerstand im Erregerstromkreis bewirkt (Nebenschlußregelung). Der magnetische Fluß kann gegenüber dem normalen Wert nur verkleinert werden; die Drehzahl wird daher erhöht (Bild 17, Kennlinien *c*). Nach diesem Verfahren kann auch schon die Leerlaufdrehzahl beeinflußt werden. Die Drehzahlkennlinien behalten die charakteristische Form des Nebenschlußmotors, d. h. die Drehzahl ändert sich nur wenig mit der Belastung. Nur die oben erwähnte Gefahr der Unstabilität wird bei starker Drehzahlerhöhung noch größer; man geht deshalb (und auch aus anderen Gründen) im allgemeinen nicht über das Regelungsverhältnis 1 : 3 hinaus. Der Wirkungsgrad bleibt bei dieser Art der Drehzahlregelung auf allen Drehzahlstufen ungefähr derselbe. Vor allem aus diesem Grunde ist die Nebenschlußregelung das praktisch weitaus am meisten angewandte Verfahren. — Aus der Tatsache, daß die abgegebene Leistung bei konstantem Drehmoment mit der Drehzahl wächst, folgt schon,

daß auch die aufgenommene Leistung, also die Stromstärke, wachsen muß. Auch aus der Gleichung (1): $M = c_1 \cdot \Phi \cdot I$ ist dies zu entnehmen. Denn in demselben Maße, in welchem die Drehzahl steigen soll, muß der Fluß sinken (Gl. 3), also muß in demselben Maße auch der Strom zunehmen, wenn das Drehmoment unverändert bleiben soll. Die Stromkurve in Bild 14 (I_0 in Bild 17) gilt also nicht mehr, wenn die Drehzahl durch Feldschwächung erhöht wurde; es entsteht vielmehr jetzt eine Schar von Stromkennlinien (Kurven I_1—I_4 in Bild 17).

Damit die mit Rücksicht auf die Erwärmung zulässige Stromstärke I_n nicht überschritten wird, muß das Drehmoment um so kleiner bleiben, je höher die Drehzahl eingestellt wird (Belastungsgrenze d in Bild 17). Diese Beschränkung ist bedeutungslos in all den Fällen, wo auch die angetriebene Maschine ein mit wachsender Drehzahl fallendes Drehmoment verlangt. Sie kann aber unangenehm werden, wenn bei allen Drehzahlen dasselbe Drehmoment verlangt wird. In diesem Fall bedingt die Nebenschlußregelung die Wahl einer größeren Motortype. Auch aus diesem Grunde geht man mit dieser Art der Regelung nicht gern allzuweit, im allgemeinen nicht über das Drehzahlverhältnis 1:3.

Auch bei Reihenschlußmotoren kann die Drehzahl durch Schwächung des magnetischen Flusses erhöht werden; hier geschieht dies mit Hilfe eines Parallelwiderstandes zur Erregerwicklung.

Vom Motor aus gesehen die beste Art der Regelung ist die durch Änderung der zugeführten Spannung. Bei dieser Art der Regelung kann man die Drehzahl vom höchst zulässigen Wert bis auf Null herunter regeln. Der Motor behält dabei auf allen Stufen das Drehzahlverhalten des Nebenschlußmotors (Bild 17, Kurve e). Die Stabilität ist auf allen Stufen gut, ebenso der Wirkungsgrad. Das Nenndrehmoment kann auf allen Stufen voll in Anspruch genommen werden. Aber

die Regelung der Spannung erfordert im allgemeinen die Aufstellung eines besonderen Stromerzeugers mit Antriebsmotor (Leonardschaltung). Dadurch entstehen hohe Anlagekosten. Die Leonardschaltung kommt deshalb nur in Betracht, wenn in sehr weiten Grenzen geregelt werden muß (z. B. bei Förderanlagen), vor allem, wenn ein Gleichstromnetz überhaupt nicht zur Verfügung steht, sondern nur ein Drehstromnetz.

Eine Halbierung der Spannung ist bei Antrieben mit zwei gleichen Motoren auch dadurch möglich, daß man diese Motoren in Reihe schaltet. Man macht davon insbesondere bei Bahnen Gebrauch und vermindert dadurch den Energieverlust beim Anlassen.

d) Bremsung

Wenn ein Motor stillgesetzt werden soll, dann muß er ein Drehmoment entgegengesetzt der Drehrichtung entwickeln; er muß gebremst werden. Dies gilt besonders, wenn die von ihm getriebene Last eine große träge Masse hat, also z. B. bei einem Straßenbahnmotor. Ebenso muß ein Motor abgebremst werden, wenn die Last sich sonst von selbst bewegen würde, also z. B. bei Bahnen im Gefälle oder bei Hebezeugen, wenn die Last gesenkt werden soll. Elektrische Motoren, insbesondere Gleichstrom-Motoren, sind imstande, bei geeigneter Schaltung die erforderliche Bremskraft selbst zu entwickeln Sie nehmen dabei mechanische Leistung auf und können dafür elektrische Leistung wieder abgeben. Sie arbeiten also dann als Generatoren. Wird diese elektrische Leistung ganz oder teilweise an das Netz zurückgegeben, dann spricht man von Nutzbremsung. Wird sie dagegen im Motorstromkreis selbst einschließlich etwa vorgeschalteter Widerstände in Wärme umgesetzt, dann nennt man dies Widerstandsbremsung oder Kurzschlußbremsung. Ein drittes Bremsverfahren ist die

Gegenstrombremsung, bei der der Motor einfach auf die entgegengesetzte Drehrichtung geschaltet wird. Er nimmt dabei auch noch elektrische Leistung aus dem Netz auf, die gleichzeitig mit der Bremsleistung in Widerständen vernichtet werden muß.

Für einen Nebenschlußmotor zeigt Bild 17 den Zusammenhang zwischen Drehzahl und Drehmoment auch für den Fall des Bremsens. Reine Nutzbremsung (Kurve *a*) ist nur möglich bei Drehzahlen, die höher liegen als die Leerlaufdrehzahl bei Motorbetrieb. Mit steigender Drehzahl steigt das Bremsdrehmoment an. Das ist notwendig, um den Bremsbetrieb stabil zu halten. Schaltet man Widerstände in den Ankerstromkreis ein (Kurven *b*), so kann man beim Bremsen höhere Drehzahlen erreichen, ohne die zulässige Stromstärke zu überschreiten. Aber der Wirkungsgrad sinkt dabei, weil ein Teil der abgebremsten Leistung in den Widerständen in Wärme umgesetzt wird. Verlangt man Nutzbremsung bei hohen Drehzahlen mit gutem Wirkungsgrad, so kann man ebenso wie beim Motorbetrieb durch Feldschwächung die Leerlaufdrehzahl heraufsetzen (Kurven *c*). Doch wird das höchstzulässige Drehmoment dabei ebenso vermindert wie beim Motorbetrieb.

Niedrigere Drehzahlen erhält man ebenso wie beim Motorbetrieb durch Verkleinerung der Spannung (Kurven *e*). Dies ist praktisch nur bei der Leonardschaltung möglich. Bei dieser Schaltung kann man bei beliebiger Drehzahl mit gutem Wirkungsgrad auf das Netz zurückarbeiten.

Hat man nur ein Gleichstromnetz konstanter Spannung zur Verfügung, dann muß man sich bei Drehzahlen unterhalb der Leerlaufdrehzahl mit der Kurzschlußbremsung begnügen. Dabei wird der Anker unmittelbar oder über Widerstände kurzgeschlossen. Im ersteren Fall entwickelt er schon bei kleinen Drehzahlen ein großes Drehmoment (Kurve f_0). Durch Widerstände kann die Neigung der Drehzahlkennlinien ver-

größert werden (Kurven f_1—f_7), ebenso wie bei der Nutzbremsung.

Bei der Gegenstrombremsung (Kurven g) erhält man bei jeder Drehzahl ein ziemlich starkes bremsendes Drehmoment. Diese Bremsung kommt daher nur vorübergehend, etwa als Notbremsung, in Betracht.

Beim Reihenschlußmotor ist eine Nutzbremsung nicht möglich. Wenn sie verlangt wird, muß der Motor zum Bremsen so umgeschaltet werden, daß er mit Fremderregung arbeitet. Eine Kurzschlußbremsung (Widerstandsbremsung) ist auch beim Reihenschlußmotor möglich. Dabei wird die Erregerwicklung mit dem Anker in derselben Reihenfolge der Klemmen verbunden wie bei entgegengesetzter Drehrichtung, also bei einem Kranmotor zum Senken der Last (Senkbremsschaltung) ebenso wie bei der Hubschaltung. Der Motor wird über Widerstände kurzgeschlossen. Erst oberhalb einer bestimmten Drehzahl ist die vom Strom abhängige im Anker induzierte Spannung größer als die Ohmsche Spannung an den Widerständen; erst oberhalb dieser Drehzahl kann der Motor sich erregen. Mit zunehmender Drehzahl wächst das Bremsdrehmoment sehr rasch (Bild 18). Die Bremsung setzt deshalb oft ruckweise ein. Will man dies vermeiden, so muß man auch hier zur Fremderregung übergehen, oder doch eine zusätzliche Fremderregung anwenden.

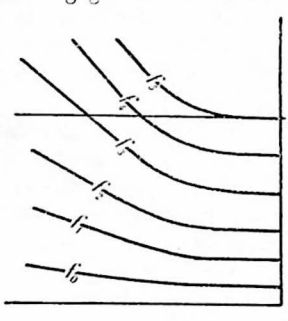

Bild 18. Kurzschlußbremsung beim Reihenschlußmotor.

f_0: Kennlinie bei reiner Kurzschlußbremsung. f_1—f_6: Kennlinien bei Kurzschlußbremsung mit Widerständen.

Die Gegenstrombremsung ist beim Reihenschlußmotor in derselben Weise möglich wie beim Nebenschlußmotor.

II. Verluste und Wirkungsgrad.

1. Berechnung.

In jeder elektrischen Maschine wird ein Teil der zugeführten Energie in Wärme umgesetzt und dadurch dem eigentlichen Verwendungszweck entzogen; es entsteht also ein Energieverlust. Nach der Entstehungsursache unterscheidet man folgende Arten von Verlusten:

1. Eisenverluste, die durch zeitliche Änderung des magnetischen Flusses entstehen und ihren Sitz vorwiegend in den Eisenteilen haben,

2. Kupferverluste (Wicklungsverluste) oder Stromwärmeverluste, die durch den Ohmschen Widerstand der stromdurchflossenen Wicklungen entstehen,

3. Reibungsverluste, also rein mechanische Verluste, die nichts mit den elektromagnetischen Vorgängen in der Maschine zu tun haben.

Die Eisenverluste entstehen aus zwei Ursachen, nämlich einerseits durch die Umlagerung der Eisenmoleküle bei jedem Richtungswechsel des magnetischen Feldes (Hysteresisverlust), andererseits durch Wirbelströme, die durch den Wechsel des magnetischen Feldes sowohl in den magnetisch wirksamen Eisenteilen selbst wie auch in anderen Metallteilen im Bereich des magnetischen Feldes entstehen (Wirbelstromverlust).

Der Energieverlust durch Hysteresis ist der Anzahl der Ummagnetisierungen proportional, der Leistungsverlust[1]) also der Ummagnetisierungsfrequenz f. Außerdem ist der Hysteresisverlust von der magnetischen Beanspruchung, also von der Induktion B abhängig. In dem Bereich der Induktion, der für elektrische Maschinen in Betracht kommt, ändert sich

[1]) Wenn man von „Verlusten" schlechthin spricht, meint man stets Leistungsverluste.

der Hysteresisverlust etwa mit der zweiten Potenz der Induktion[1]).

Der Wirbelstromverlust ändert sich ebenfalls mit dem Quadrat der magnetischen Induktion, aber im Gegensatz zum Hysteresisverlust auch mit dem Quadrat der Ummagnetisierungsfrequenz. Denn in jeder Wirbelstrombahn wird eine Spannung induziert, welche der Induktion B und der Frequenz f proportional ist. Mit der Spannung wächst auch der Strom in dieser Wirbelstrombahn; der Verlust aber geht als Ohmscher Verlust ($I^2 \cdot R$) mit dem Quadrat des Stromes.

Beide Verluste, sowohl der Hysteresisverlust wie der Wirbelstromverlust, entstehen in jedem einzelnen Volumenelement oder Gewichtselement in gleicher Weise; sie sind also dem Gewicht des Eisens proportional. Man rechnet deshalb den gesamten Eisenverlust nach der Formel

$$(4) \qquad V_e = v_h \cdot \frac{f}{50} \cdot \left(\frac{B}{10000}\right)^2 \cdot G_e + \\ + v_w \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^2 \cdot \left(\frac{B}{10000}\right)^2 \cdot G_e.$$

Hier bedeutet G_e das Gewicht des Eisenteiles, in welchem die Verluste entstehen, in kg, f die Ummagnetisierungsfrequenz in Per/sec (Hz), B den Scheitelwert der magnetischen Induktion, v_h einen Beiwert (Verlustziffer) für den Hysteresisverlust, v_w den entsprechenden Beiwert für den Wirbelstromverlust. Beträgt die Frequenz $f = 50$ Hz, dann kann man auch nach der folgenden Formel rechnen:

$$(4a) \qquad V_e = v_{10} \cdot \left(\frac{B}{10000}\right)^2 \cdot G_e.$$

Hier ist $v_{10} = v_h + v_w$ die Verlustziffer bei 50 Hz und 10000 Gauß. Bei Blechen von 0,5 mm Stärke bedingt der Hysteresis-

[1]) Nicht mit der 1,6ten Potenz. So rechnete man früher auf Grund von Messungen, die bei niedrigeren Induktionen durchgeführt wurden.

verlust etwa $^2/_3$, der Wirbelstromverlust etwa $^1/_3$ der Verlustziffer; also

$$v_h = {}^2/_3\, v_{10};\quad v_w = {}^1/_3\, v_{10}. \tag{4b}$$

Die Verlustziffer wird bei den üblichen Prüfungen der Dynamobleche gemessen und von den Lieferwerken der Bleche garantiert. Sie ist von der Legierung der Bleche abhängig; ein Zusatz von Silizium vermindert die Verlustziffer. Bei den gewöhnlichen Dynamoblechen beträgt die Verlustziffer $v_{10} =$ 3,6 Watt/kg, bei den sog. legierten Blechen liegt sie niedriger. Es sind Sorten mit 3,0 W/kg, 2,3 W/kg und 1,7 W/kg genormt, doch werden auch schon Bleche bis herunter zu 1,0 W/kg geliefert. Der Wirbelstromverlust (nicht der Hysteresisverlust) ist auch von der Stärke der Bleche abhängig. Die angegebenen Werte gelten für 0,5 mm-Bleche. Für Gleichstrommaschinen kommen nur gewöhnliche oder schwachlegierte Dynamobleche in Betracht; im allgemeinen auch nur in normaler Stärke (0,5 mm), für Hauptpole ev. auch stärkere Bleche.

In einer Gleichstrommaschine entstehen Eisenverluste hauptsächlich in den Ankerzähnen und im Ankerkern. Für den Ankerkern rechnet man dabei mit der mittleren Induktion B_a (Bd. I, S. 64). Die Zähne kann man für die Berechnung der Eisenverluste in mehrere Teile mit angenähert konstanter Induktion zerlegen, man kann aber auch hier genau genug mit der mittleren Induktion B_{zm} (in der Mitte der Zahnhöhe nach Bd. I, S. 64, Bild 40) rechnen. Die Ummagnetisierungsfrequenz ist für den Anker und für die Zähne $f = p \cdot \frac{n}{60}$ (Bd. I, S. 45).

Auch in den Polschuhen entsteht ein Eisenverlust, weil dort die Induktion mit der Nutenfrequenz $f_n = Z \cdot \frac{n}{60}$ pulsiert (Bd. I, Bild 38). Dieser Verlust erstreckt sich nur auf

eine dünne Oberflächenschicht und wird deshalb auch als Oberflächenverlust bezeichnet. Er ist nur bei massiven Polschuhen erheblich, bei geblechten Polschuhen dagegen sehr gering. Auch dieser Verlust kann berechnet werden; wegen der Ungenauigkeit der ganzen Eisenverlustberechnung soll jedoch hier davon abgesehen werden.

Der an der fertigen Maschine gemessene Eisenverlust ist immer erheblich größer als der in der angegebenen Weise aus der Verlustziffer errechnete Betrag, oft ein Mehrfaches desselben. Die Ursache für diese Abweichung liegt zum Teil in Ungenauigkeiten der Herstellung, zum Teil in Ungenauigkeiten der Rechnung. Der beim Stanzen der Bleche entstandene Grat führt leicht zu einer Beschädigung der Isolation zwischen den Blechen. Dadurch können mehrere Bleche zu einem leitenden Körper vereinigt werden; die Wirbelstromverluste werden dann größer. Von den Ungenauigkeiten der Rechnung ist die bedeutendste die, daß die Formel (4) für den Wirbelstromverlust nur bei sinusförmigem zeitlichen Verlauf der Induktion gilt, während die Induktion in den Zähnen in Wirklichkeit nach der Feldkurve (Bd. I, Bild 36) pulsiert. Auch die ungleichmäßige Verteilung der Induktion im Ankerkern bewirkt eine Erhöhung der Verluste.

Bei Belastung sind die Eisenverluste höher als bei Leerlauf wegen der Feldverzerrung (Bd. I, Bild 46). Den Unterschied rechnet man zu den „zusätzlichen Verlusten“ (S. 39).

Wirbelstromverluste entstehen nicht nur in den Eisenteilen, die den magnetischen Fluß führen sollen, sondern auch in der Wicklung und in massiven Eisenteilen wie Preßplatten und Wicklungsträgern. Soweit diese Verluste durch das Hauptfeld der Maschine (Leerlauffeld) bedingt sind, wie z. B. die Wirbelstromverluste in der Wicklung infolge des Nutenlängsfeldes, werden sie zu den Eisenverlusten gerechnet, weil sie mit diesen zusammen gemessen werden und meßtechnisch nicht von ihnen getrennt werden können.

Zu den Stromwärmeverlusten gehören: der Verlust in der Erregerwicklung (Erregungsverlust), der Stromwärmeverlust in der Ankerwicklung und in den mit ihr in Reihe geschalteten Wicklungen, wie Reihenschluß-Erregerwicklung, Wendepolwicklung und evtl. Kompensationswicklung, und der Übergangsverlust an den Bürsten des Stromwenders.

Die Verluste in den Wicklungen (V_k) sind aus dem Strom I und dem Ohmschen Widerstand R zu berechnen:

$$V_k = I^2 \cdot R. \tag{5}$$

Sie sind von der Temperatur abhängig. Die Temperatur der Wicklungen im betriebswarmen Zustand wird nach REM § 60 mit 75° C angenommen. Für diese Temperatur werden deshalb die Stromwärmeverluste berechnet. Bei 75° C ist der spezifische Widerstand des Kupfers 0,0215 Ohm für 1 m und 1 mm², der des Aluminiums 0,0355 Ohm/m/mm².

Der Erregungsverlust ist für die Berechnung des Wirkungsgrades einschließlich des Verlustes im Regelwiderstand zu bestimmen, für die Berechnung der Erwärmung dagegen ohne diesen Verlust. Im ersteren Fall ist der Verlust von der Wicklungstemperatur unabhängig; er ist einfach gleich dem Produkt aus dem Erregerstrom und der Erregerspannung.

Der Übergangsverlust an den Bürsten des Stromwenders ist gleich dem Produkt aus dem Ankerstrom und der mittleren Übergangsspannung an den positiven und negativen Bürsten zusammen. Diese Übergangsspannung ist abhängig von der Kohlensorte; der für eine Bürste gültige Mittelwert bei gleichmäßiger Verteilung des Stromes über die Bürstenfläche kann aus Bild 19 entnommen werden. Wegen der Unsicherheit dieser Werte und der ungleichmäßigen Stromverteilung rechnet man jedoch praktisch bei allen Kohle- und Graphitbürsten mit einer Übergangsspannung von 1,0 V für jede Bürste, bei metallhaltigen Bürsten mit 0,3 V für jede Bürste.

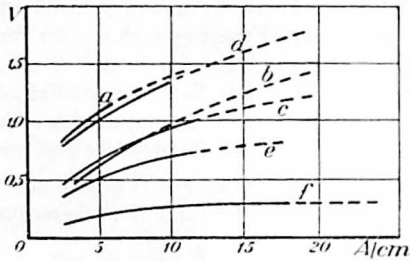

Bild 19. Übergangsspannung verschiedener Kohlensorten, abhängig von der Stromdichte.

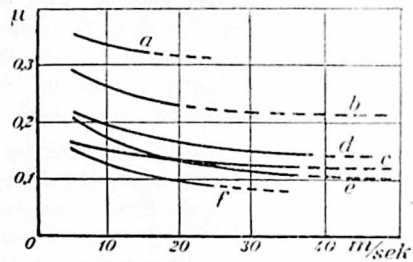

Bild 20. Reibungsziffer verschiedener Kohlensorten, abhängig von der Umfangsgeschwindigkeit der Schleiffläche.

Zu Bild 19 und 20.

a Harte Kohle. *b* Mittelharte Kohle. *c* Naturgraphitkohle. *d* Elektrographitierte Edelkohle. *e* Graphitreiche Bronzekohle. *f* Hochmetallische Bronzekohle. Die Kurven sind bis zu den im Dauerbetrieb üblichen Belastungen und Geschwindigkeiten ausgezogen.

Zu den Reibungsverlusten gehören: Die Lagerreibung, die Luftreibung und die Bürstenreibung.

Die Lagerreibung kann bei gewöhnlichen Gleitlagern nach der Dettmarschen Formel berechnet werden:

$$V_{rl} = 0{,}52 \cdot d \cdot l \cdot v^{1{,}5}. \tag{6a}$$

Hier bedeutet V_r den Reibungsverlust in Watt, d den Zapfendurchmesser und l die Zapfenlänge in cm, v die Zapfen-

umfangsgeschwindigkeit in m/sec. Die Formel gilt für die Lagertemperatur 50° C. Der Lagerreibungsverlust ist der Lagertemperatur umgekehrt proportional; er ist deshalb z. B. nach dem Anlauf der Maschine zunächst höher.

Bei Wälzlagern (Kugellagern und Rollenlagern) rechne man nach der Formel

$$V_{rl} = (0{,}015 \ldots 0{,}03) \cdot P \cdot v. \tag{6b}$$

Hier bedeutet P die Belastung des Lagers in kg, v die Umfangsgeschwindigkeit in m/sec, bezogen auf den Mittelpunkt der Kugeln oder Rollen. Bei Wälzlagern ist der Reibungsverlust immer wesentlich kleiner als bei Gleitlagern.

Der Luftreibungsverlust ist rechnerisch nur schwer zu erfassen. Er wächst bei einer bestimmten Maschine mit der dritten Potenz der Drehzahl und kann bei raschlaufenden Maschinen mit kräftiger Kühlung recht erhebliche Werte erreichen.

Der Bürstenreibungsverlust kann berechnet werden nach der Formel

$$V_{rb} = 9{,}81 \cdot \mu \cdot p \cdot F \cdot v_k. \tag{7}$$

Hier bedeutet F die gesamte Bürstenfläche in cm², v_k die Stromwender-Umfangsgeschwindigkeit, p den Auflagedruck der Bürsten, der im allgemeinen 0,15—0,20 kg/cm² beträgt, und μ die Reibungsziffer, die für die verschiedenen gebräuchlichen Kohlensorten aus Bild 20 entnommen werden kann. Diese Reibungsziffer ist aber auf Schleifringen gemessen; auf Stromwendern ist sie etwa 20% größer.

Neben diesen Verlusten entstehen noch eine Reihe anderer, die man unter der Bezeichnung „Zusatzverluste" zusammenfaßt. Das gemeinsame Kennzeichen dieser Zusatzverluste ist, daß sie von magnetischen Feldern herrühren, die erst bei Belastung hinzukommen, wie z. B. das Ankerquerfeld,

welches die Erhöhung der Eisenverluste bei Belastung bedingt (S. 36), sodann das Nutenquerfeld (Nutenstreufeld) und auch andere Streufelder.

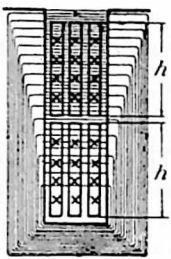

Bild 21. Nutenstreufeld.

Wir wollen die durch das Nutenstreufeld entstehenden Verluste näher betrachten. Bild 21 zeigt den Verlauf des Nutenstreufeldes. Es wird von dem Strom in den Leitern derselben Nut erregt und schließt sich im Ankereisen um den unteren Rand der Nut herum. Betrachtet man eine Wirbelstrombahn, die aus zwei Stromfäden am oberen und am unteren Rande eines Leiters zusammengesetzt ist, dann wird diese Wirbelstrombahn von einem magnetischen Fluß durchsetzt, der jeweils bei einer Stromwendung sehr rasch seine Richtung wechselt und dadurch in der Wirbelstrombahn eine erhebliche Spannung induziert. Der von dieser Wirbelstrombahn umfaßte Fluß und somit auch der Wirbelstromverlust ist um so größer, je größer die Leiterhöhe h ist. Er ist also nur bei Stabwicklung (Band I, S. 18) von Bedeutung. Man wählt deshalb die Stabhöhe bei der üblichen Zweischichtwicklung im allgemeinen nicht größer als 15 mm bis höchstens 20 mm. Würde man höhere Stäbe verwenden, so würde man durch den Mehraufwand an Kupfer nichts mehr gewinnen, weil der Wirbelstromverlust fast ebenso stark zunehmen würde wie der normale Stromwärmeverlust infolge des größeren Leiterquerschnittes abnähme.

Die vom Belastungsstrom abhängigen magnetischen Felder, insbesondere die Streufelder, verlaufen überwiegend in Luft bzw. in unmagnetischen Teilen und sind deshalb dem Strom proportional. Die durch sie bedingten Zusatzverluste gehen also mit dem Quadrat des Stromes, ebenso wie die Stromwärmeverluste in den Wicklungen.

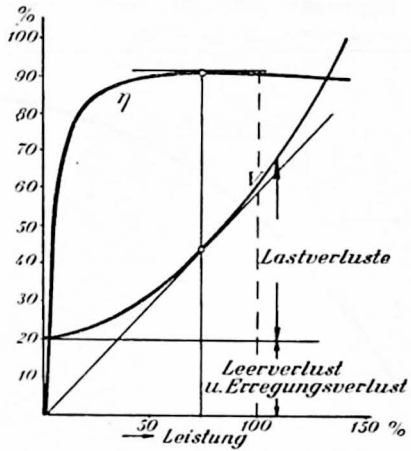

Bild 22. Verluste und Wirkungsgrad, abhängig von der Belastung.

Während der Reibungsverlust nur von der Drehzahl der Maschine abhängt, ist der Eisenverlust von der Drehzahl und dem magnetischen Fluß (also auch von der Spannung) abhängig, der Erregungsverlust überwiegend vom magnetischen Fluß (bzw. von der Spannung), der Stromwärmeverlust nur vom Strom, der Zusatzverlust aber vom Strom und von der Drehzahl und z. T. auch vom magnetischenFluß, also von der Spannung. Bei dem üblichen Betrieb der Maschinen mit konstanter Spannung und wenigstens angenähert konstanter Drehzahl (also bei allen Maschinen mit überwiegender Nebenschlußerregung) sind daher Reibungsverlust und Eisenverlust unabhängig von der Belastung. Sie entstehen auch schon bei Leerlauf und werden deshalb als „Leerverluste" bezeichnet. Ähnliches gilt für den Erregungsverlust. Der Stromwärmeverlust im Anker und in den Reihenschlußwicklungen und ebenso der Übergangsverlust an den Bürsten und der Zusatz-

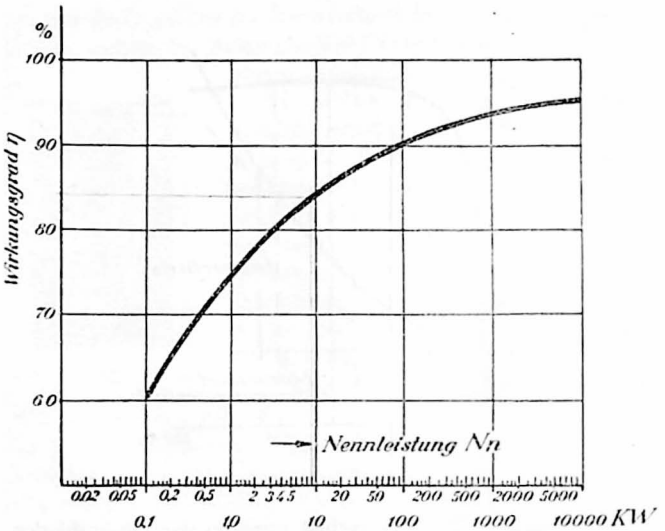

Bild 23. Wirkungsgrad von Gleichstrommaschinen, abhängig von der Größe der Maschinen.

verlust sind dagegen von der Belastung abhängig und werden als „Lastverluste“ bezeichnet.

Bild 22 zeigt den Verlauf der Verluste in Abhängigkeit von der Belastung und den daraus berechneten Wirkungsgrad η. Der Wirkungsgrad erreicht seinen Höhepunkt bei der Leistung, bei welcher der Stromwärmeverlust gleich der Summe aus Leerverlust und Erregungsverlust ist. In einem weiten Belastungsbereich, meist etwa von Halblast bis Nennlast, entfernt sich der Wirkungsgrad nicht weit von diesem Höchstwert. Erst bei Überlastung wird er merklich kleiner, ebenso bei sehr kleinen Belastungen.

Mit der Größe der Maschinen nimmt der Wirkungsgrad zu. Bild 23 zeigt den Wirkungsgrad bei Nennlast für Maschinen

von 0,1 kW bis zu 10000 kW. Diese Kurve gilt für normale offene Maschinen mit den üblichen Drehzahlen und mit der günstigsten Spannung.

2. Messung

Der Wirkungsgrad einer elektrischen Maschine kann auf drei verschiedene Arten gemessen werden, nämlich durch direkte Messung, durch das Rückarbeitsverfahren und durch das Einzelverlustverfahren. (REM[1]) § 49 . . . 62.)

Bei der direkten Messung wird die von der Maschine abgegebene Leistung (Abgabe) und die von ihr aufgenommene Leistung (Aufnahme) gemessen. Dazu muß die Maschine vollbelastet sein. Das ist oft nicht leicht einzurichten. Insbesondere bei großen Maschinen ist die zur Speisung der Maschine bei Vollast benötigte Leistung nicht überall verfügbar und auch die abgegebene Leistung kann nicht ohne weiteres nutzbar verwertet oder auch nur vernichtet, d. h. in Wärme umgesetzt werden. Auch ist die mechanische Leistung (also bei Stromerzeugern die Aufnahme, bei Motoren die Abgabe) nicht so einfach und nicht so genau zu messen wie die elektrische. Endlich haben die Meßfehler bei der direkten Messung einen viel größeren Einfluß auf das Ergebnis als bei den indirekten Messungen. Deshalb kommt die direkte Messung praktisch nur bei kleinen Maschinen in Betracht, deren Wirkungsgrad nicht allzu hoch liegt, insbesondere bei kleineren Motoren, deren Leistung man durch eine Bremse (Bremsseil, Bremsband, Wirbelstrombremse) vernichten und gleichzeitig messen kann.

Das Rückarbeitsverfahren kommt nur dann in Betracht, wenn zwei gleiche Maschinen vorhanden sind, die miteinander gekuppelt werden können. Wenn man die eine Maschine an eine Stromquelle mit geeigneter Spannung anschließt

[1]) REM = Regeln für elektrische Maschinen, herausgegeben vom Verband Deutscher Elektrotechniker, Ausgabe 1955.

und sie so als Motor laufen läßt, kann man die andere bei geeigneter Erregung mit derselben Stromquelle parallel schalten. Vergrößert man dann die Erregung der zweiten Maschine, so wird diese als Stromerzeuger Leistung an die Stromquelle abgeben; gleichzeitig wird die erste Maschine als Motor belastet werden und eine entsprechend größere Leistung aufnehmen. Die Stromquelle muß immer nur die Differenz dieser beiden Leistungen liefern. Durch geeignete Erregung der beiden Maschinen kann jede beliebige Leistung bei der gewünschten Drehzahl (Nenndrehzahl) eingestellt werden.

Die Ankerstromstärken der beiden Maschinen werden bei dieser Anordnung nicht genau gleich sein. Will man den Wirkungsgrad bei der Nennstromstärke messen, so wird man deshalb die Stromstärke der einen Maschine etwas höher, die der anderen um ebensoviel niedriger als die Nennstromstärke einstellen, so daß im Mittel beide Maschinen den Nennstrom führen. Auch die induzierte Spannung, die bei gegebener Drehzahl für den magnetischen Fluß und damit für den Eisenverlust und den Erregungsverlust maßgebend ist, wird nicht bei beiden Maschinen gleich sein, sondern bei der als Stromerzeuger arbeitenden etwas größer, bei der als Motor arbeitenden etwas kleiner als die Klemmenspannung. Man macht deshalb den Mittelwert der beiden induzierten Spannungen, also die Klemmenspannung beim Rückarbeitsversuch, ebenso groß wie beim späteren Nennbetrieb die induzierte Spannung sein wird, also bei der Untersuchung zweier Generatoren etwas größer als die Nennspannung, bei der Untersuchung zweier Motoren etwas kleiner. Der Unterschied zwischen der Klemmenspannung beim Rückarbeitsversuch und der Nennspannung entspricht in beiden Fällen dem Spannungsabfall im Ankerstromkreis und kann als relativ unwichtige Korrekturgröße rechnerisch (aus dem gemessenen Ankerwiderstand) genau genug ermittelt werden.

Man mißt nun die Leistung, die aus der oben erwähnten

Stromquelle entnommen wird (also die Differenz der Leistungen in beiden Ankerstromkreisen), und außerdem die Leistung, die den beiden Erregerstromkreisen zugeführt wird. Diese ganze Verlustleistung muß auf die beiden Maschinen verteilt werden. Am einfachsten nimmt man an, daß jede der beiden Maschinen die Hälfte des insgesamt gemessenen Verlustes aufweisen würde, wenn sie mit dem Mittelwert der beiden Ankerströme belastet wäre. Danach berechnet man den Wirkungsgrad.

Es ist auch möglich, bei einem Rückarbeitsversuch die Verlustleistung mechanisch zuzuführen, indem man die zu untersuchende Maschine durch einen geeichten Hilfsmotor antreibt, d. h. durch einen Motor, dessen Verluste genügend genau bekannt sind. Der Hilfsmotor ist nur klein im Vergleich mit den zu untersuchenden Maschinen. Die Erregung kann bei diesem Versuch aus einer besonderen Hilfsstromquelle entnommen werden; es kann aber auch mit Selbsterregung gearbeitet werden. Durch geeignete Erregung kann man auch hier die gewünschte Spannung und die gewünschte Stromstärke einstellen. Gleichzeitige Verstärkung der Erregung beider Maschinen erhöht die Spannung; Verstärkung der Erregung bei der einen und Schwächung bei der anderen Maschine verändert die Stromstärke. Man mißt die vom Hilfsmotor aufgenommene elektrische Leistung und zieht davon die bekannten Verluste des Hilfsmotors ab. Der Rest ist gleich der mechanischen Leistung an der Welle und deckt die Verluste der beiden zu untersuchenden Maschinen.

Einen Übergang von der direkten Messung des Wirkungsgrades zum Rückarbeitsverfahren bilden diejenigen Verfahren, bei welchen die mechanische Leistung durch eine zweite, wenn auch nicht gleiche Maschine (Hilfsmaschine) geliefert bzw. aufgenommen wird. Dabei ist es gleichgültig, ob die zu untersuchende Maschine als Motor arbeitet und die Hilfsmaschine als Stromerzeuger die Leistung ins Netz zu-

rückgibt, oder umgekehrt. Auch bei diesen Verfahren braucht man keine Stromquelle für die volle Leistung der zu untersuchenden Maschine, und man braucht auch die abgegebene Leistung nicht zu vernichten; man hat vielmehr auch hier einen Leistungskreislauf. Nur muß hier sowohl die Abgabe wie die Aufnahme der zu untersuchenden Maschine gemessen werden; diese Verfahren gehören also noch zu den direkten Meßverfahren. Die mechanische Leistung kann dabei entweder aus der elektrischen Leistung der Hilfsmaschine errechnet werden, wenn man die Verluste der Hilfsmaschine genau genug kennt (geeichte Hilfsmaschine), oder sie kann durch mechanische Messungen (Drehzahl und Drehmoment) bestimmt werden. Das Drehmoment kann entweder dadurch gemessen werden, daß man den Ständer der Hilfsmaschine drehbar lagert und das auf ihn wirkende Drehmoment durch einseitige Gewichtsbelastung ausgleicht (Pendeldynamo) oder dadurch, daß man zwischen die zu untersuchende Maschine und die Hilfsmaschine ein Torsionsdynamometer einbaut.

Die Verluste sind von der Temperatur abhängig, insbesondere der Stromwärmeverlust von der Wicklungstemperatur. Man muß deshalb bei der direkten Messung des Wirkungsgrades und ebenso natürlich beim Rückarbeitsverfahren die zu untersuchenden Maschinen in den betriebswarmen Zustand bringen. Da die Maschinen bei diesen Verfahren voll belastet sind, ist das ohne weiteres möglich, wenn man lange genug wartet, ehe man die Messung des Wirkungsgrades durchführt.

Noch größere praktische Bedeutung als die bisher betrachteten Verfahren der Wirkungsgradmessung hat das Einzelverlustverfahren. Bei diesem braucht die zu untersuchende Maschine nicht belastet zu werden. Man mißt vielmehr den Leerverlust, der von der Belastung unabhängig ist, bei Leerlauf, und den Stromwärmeverlust, der von der Drehzahl unabhängig ist, bei Stillstand. Nur der Übergangsverlust an den Bürsten und die Zusatzverluste, die sowohl von der

Belastung als von der Drehzahl abhängig sind, werden hierbei nicht erfaßt und müssen geschätzt werden.

Die Stromwärmeverluste in den Wicklungen ($I^2 \cdot R$) brauchen nicht bei der vollen Stromstärke gemessen zu werden. Es genügt, wenn man auf irgendeine Weise (mit einem kleinen Meßstrom) die Widerstände der Wicklungen ermittelt. Der Widerstand einer Wicklung ist von der Temperatur abhängig; gleichzeitig mit der Widerstandsmessung muß also auch die Temperatur der Wicklungen beobachtet werden. Da man mit dem Thermometer nicht alle Stellen der Wicklung abtasten kann, oft sogar auf die Messung der Eisentemperatur sich beschränken muß [1]), so muß man Unterschiede der Temperatur innerhalb der Maschine vermeiden. Man mißt deshalb die Widerstände nach einer längeren Ruhepause der Maschine und mit einem so kleinen Strom, daß während der Messung selbst keine merkliche Erwärmung eintritt. Zur Berechnung des Wirkungsgrades werden die Widerstände auf die Betriebstemperatur umgerechnet. Diese wird mit 75° C angenommen, wenn sie nicht aus einem Dauerbelastungsversuch bekannt ist.

Der Erregungsverlust wird als Produkt aus Erregerspannung und Erregerstrom berechnet. Bei einem Motor, dessen Erregerstrom nicht geregelt wird, kann man den Widerstand des Erregerstromkreises messen, ihn auf die Betriebstemperatur umrechnen und daraus den Erregerstrom durch Rechnung bestimmen. Bei einer Maschine, deren Erregerstrom geregelt wird, insbesondere bei einem Stromerzeuger, muß man dagegen den Erregerstrom, wenn er nicht durch einen Belastungsversuch bekannt ist, aus dem Leerlaufversuch entnehmen und die Zunahme des Erregerstromes mit der Belastung wenigstens angenähert durch Rechnung zu erfassen suchen.

Die Leerverluste (Reibungs- und Eisenverlust) findet man durch einen Leerlaufversuch. Dabei läßt man die Maschine

[1]) Die Messung der Raumtemperatur genügt im allgemeinen nicht.

als Motor mit der Nenndrehzahl laufen. Anstatt der Nennspannung U führt man ihr aber eine Spannung U_0 zu, die gleich der bei Belastung zu induzierenden Spannung ist: $U_0 = E = U \mp I \cdot R$. Dabei gilt das Pluszeichen für eine Maschine, die als Stromerzeuger arbeiten soll, das Minuszeichen für eine, die als Motor arbeiten soll. Da der Reibungsverlust stark vom Zustand der Lager abhängig ist, müssen die Lager vor der Messung eine Zeit lang eingelaufen sein, große Gleitlager u. U. einige Stunden lang. Von der Leistung, die die Maschine bei diesem Leerlaufversuch aufnimmt (Leerlaufleistung), zieht man noch die Erregungsleistung ab, wenn man nicht schon die Leistungsaufnahme des Ankerstromkreises allein gemessen hat. Genau genommen muß auch der Stromwärmeverlust und der Bürstenübergangsverlust, der dem Leerlaufstrom entspricht, abgezogen werden. Doch ist dieser Betrag nur sehr klein.

Auch bei einem Reihenschlußmotor kann man den Leerverlust bestimmen, indem man den Motor aus einer Stromquelle mit kleiner Spannung fremd erregt und dann leer laufen läßt. Hat man einen bestimmten Erregerstrom eingestellt, dann berechnet man den Spannungsabfall, den dieser Strom im Anker und in den Reihenschlußwicklungen verursachen würde, wenn er den ganzen Motor durchflösse. Zieht man diesen Spannungsabfall von der Nennspannung ab, so erhält man die Spannung, die beim Betrieb des Motors mit diesem Strom induziert werden muß. Gleich dieser induzierten Spannung macht man die Klemmenspannung am Anker beim Leerlaufversuch. Dann stellt sich bei diesem Versuch die richtige Drehzahl ein; man findet also den Reibungs- und Eisenverlust für einen Betriebspunkt. Diesen Versuch wiederholt man mit verschiedenen Erregerströmen und den entsprechend berechneten Spannungen am Anker. Man findet dadurch gleichzeitig auch eine Drehzahlkurve, die an Genauigkeit ungefähr derjenigen gleichwertig ist, die man aus der bei kon-

stanter Drehzahl aufgenommenen Leerlaufkennlinie konstruieren kann (vgl. S. 25).

Der Übergangsverlust an den Bürsten wird beim Einzelverlustverfahren nicht gemessen, sondern berechnet. Man setzt dabei für den Spannungsabfall unter einer Bürstenreihe bei Kohle- und Graphitbürsten 1,0 V. ein, bei metallhaltigen Bürsten 0,3 V. (vgl. S. 37).

Die Zusatzverluste, die sowohl vom Strom als auch von der Drehzahl und der Spannung abhängig sind, können beim Einzelverlustverfahren, d. h. ohne Belastung der Maschine, nicht gemessen werden. Man muß sie schätzen. Zu ihnen gehört u. a. auch die Erhöhung des Eisenverlustes bei Belastung. Diese ist von der Feldverzerrung abhängig. Bei Maschinen mit Kompensationswicklung entsteht sie also nicht. Die Schätzung muß daher bei solchen Maschinen anders ausfallen als bei Maschinen ohne Kompensationswicklung. Nach Vorschrift des VDE (REM § 62) nimmt man deshalb an, daß die Zusatzverluste bei Maschinen mit Kompensationswickung 0,5%, bei Maschinen ohne Kompensationswicklung 1,0% betragen. Diese Zahlen gelten für Nennbetrieb. Es wird angenommen, daß der Zusatzverlust dem Quadrat der Stromstärke proportional ist.

Diese Schätzung der Zusatzverluste, die natürlich nicht genau sein kann, u. U. sogar sehr erheblich von der Wahrheit abweicht, ist der einzige Nachteil des sonst so idealen Einzelverlustverfahrens. Er ist besonders bei großen Maschinen von Bedeutung, bei denen alle anderen Verluste relativ klein werden, während der Zusatzverlust dieselbe Größenordnung hat wie bei kleinen Maschinen. Verlangt man bei solchen Maschinen eine genauere Wirkungsgradbestimmung, dann muß man das Rückarbeitsverfahren wählen, was nur möglich ist, wenn man zwei gleiche Maschinen zur Verfügung hat.

III. Die Erwärmung

1. Grenzen der zulässigen Erwärmung

Durch die Verluste erwärmen sich die elektrisch oder magnetisch wirksamen Maschinenteile. Dadurch werden auch die anderen Maschinenteile angeheizt. Empfindlich gegen zu hohe Temperaturen ist vor allem die Isolation der Wicklung, dann aber auch andere Teile, wie die Blechpakete, der Stromwender und die Lager. Alle diese Teile dürfen eine bestimmte Höchsttemperatur nicht überschreiten. In den REM sind deshalb Grenzwerte der Temperatur festgesetzt (REM § 33).

Durch die Verluste ist noch nicht eigentlich die Temperatur der einzelnen Maschinenteile bestimmt, sondern ihre Übertemperatur über die Umgebung oder über das Kühlmittel. Diese Übertemperatur nennt man die Erwärmung. Auch für die Erwärmung sind in den REM Grenzwerte festgesetzt, und zwar so, daß bei der höchsten voraussichtlich vorkommenden Umgebungstemperatur (oder Kühlmitteltemperatur) die zulässige Grenztemperatur nicht überschritten wird. Dabei ist die höchste voraussichtlich vorkommende Umgebungstemperatur mit 40° C angenommen. Wird sie höher, so muß die Erwärmung entsprechend herabgesetzt werden, d. h. die Maschine darf nicht mehr voll belastet werden. Andererseits ist es zulässig, in Fällen, in denen die Kühlmitteltemperatur mit Sicherheit stets unter dem angegebenen Wert von 40° C bleibt, zwischen Hersteller und Besteller einer Maschine eine höhere zulässige Erwärmung zu vereinbaren, wenn dabei die zulässige Grenze der Temperatur nicht überschritten wird.

Die zulässige Erwärmung (Grenzerwärmung) der Wicklungen ist abhängig von der Art der Isolierung. Bei der am häufigsten vorkommenden Isolierung mit Baumwolle, Seide, Papier und ähnlichen Faserstoffen (Isolierung Klasse A) wird eine Grenzerwärmung von 60° C zugelassen. Vorausgesetzt ist dabei, daß die Isolierung mit einem guten Isoliermittel

getränkt ist, welches die Fasern vollständig einhüllt und sie aneinander und am Leiter haften läßt. Dieses Tränkmittel muß natürlich auch wärmebeständig sein und darf bei der zugelassenen Grenztemperatur nicht tropfbar weich werden.

Eine höhere Erwärmung wird zugelassen bei einer Isolierung, die von organischen Faserstoffen frei ist, so z. B. bei Lackdraht (Isolierung Klasse E, zulässige Erwärmung 75° C) und bei Glimmer-, Asbest- und Glas-Erzeugnissen, die je nach dem verwendeten Tränkmittel als Klasse B (zulässige Erwärmung 80° C), Klasse F (100° C) oder Klasse H (125° C) bezeichnet werden. Bei Klasse B kann z. B. Schellack als Bindemittel verwendet werden, bei Klasse F Silikone, die mit organischen Kunststoffen modifiziert sind, bei Klasse H Rein-Silikone.

Diese Grenzerwärmungen gelten sowohl für die Wicklungen wie auch für die Eisenteile, in welche die Wicklungen eingebettet sind. Für einlagige Feldwicklungen (z. B. Wendepolwicklungen nach Bd. I, Bild 5) wird eine etwas höhere Erwärmung zugelassen. Für den Stromwender ist eine Grenzerwärmung von 60° C festgelegt, für die Lager eine Grenzerwärmung von 45° C.

Die zulässigen Grenzwerte der Temperatur liegen um mindestens 40° C höher als die eben genannten Zahlenwerte, also für Wicklung, Eisen und Stromwender über 100° C. Es ist also nicht berechtigt, wenn man, wie es leider immer noch häufig vorkommt, eine Maschine schon als zu warm bezeichnet, weil man irgendeinen Maschinenteil nicht mehr mit der Hand berühren kann. Es schadet einer elektrischen Maschine gar nichts, wenn sie mehr als „handwarm" wird. Auch ist der Begriff „handwarm" sehr unbestimmt, denn man kann einen Körper mit schlechter Wärmeleitfähigkeit (trockenes Holz, Faserstoffe u. dgl.) bei viel höherer Temperatur noch berühren als einen Körper mit guter Wärmeleitfähigkeit (blankes Metall).

2. Messung der Erwärmung

Grundsätzlich gelten die im vorigen Abschnitt angegebenen Grenztemperaturen für den heißesten Punkt eines jeden Maschinenteils. Da die Wärme im Inneren der Wicklungen und der Blechpakete entsteht und nach außen abgegeben wird, so ist die Temperatur im Inneren höher als an der Oberfläche. Dies gilt besonders bei Wicklungen, die aus vielen dünnen Drähten bestehen und deshalb viele Isolierstoffe enthalten, die für den Wärmestrom einen erheblichen Widerstand bedeuten. Praktisch ist es meist nicht möglich, die Temperatur des heißesten Punktes zu messen. Man bestimmt deshalb die Temperatur von Wicklungen durch eine Widerstandsmessung, und erhält so wenigstens die mittlere Temperatur des Wicklungskörpers. Wenn man gleichzeitig mit einem Thermometer an der vermutlich heißesten Stelle der Wicklungsoberfläche mißt, dann ist die höhere der beiden gemessenen Temperaturen maßgebend; sie darf die im vorigen Abschnitt angegebenen Werte nicht überschreiten. Nur bei sehr großen Maschinen baut man Thermoelemente oder Widerstandsthermometer ein, mit denen man ungefähr die höchste Wicklungstemperatur messen kann.

Bei anderen Maschinenteilen genügt im allgemeinen die Messung der Oberflächentemperatur mit dem Thermometer, weil bei reinen Metallteilen im Inneren keine nennenswerten Temperaturdifferenzen bestehen.

Der Widerstand von Kupferwicklungen wächst proportional mit $(235 + \vartheta)$, wenn ϑ die Temperatur der Wicklungen in ^{0}C bedeutet; der Widerstand von Aluminiumwicklungen wächst proportional mit $(245 + \vartheta)$. Mit anderen Worten: Für je 1^0 C Temperaturerhöhung wächst der Widerstand um 0,4% ($= {}^1/_{250}$) desjenigen Widerstandes, den die Kupferwicklung bei 15^0 C oder die Aluminiumwicklung bei 5^0 C aufweist. Mißt man den Widerstand einer Wicklung zunächst vor Beginn einer Erwärmungsprobe bei kalter Maschine (R_{kalt}),

also nach einer längeren Ruhepause der Maschine (vgl. S. 47), und mißt man gleichzeitig die Temperatur an der Wicklungsoberfläche (ϑ_{kalt}), so braucht man später nach eingetretener Erwärmung nur nochmals den Widerstand zu messen (R_{warm}), um daraus die Temperatur zur Zeit dieser Messung (ϑ_{warm}) zu bestimmen nach der Formel

$$(8) \quad \vartheta_{warm} - \vartheta_{kalt} = \frac{R_{warm} - R_{kalt}}{R_{kalt}} \cdot (235 + \vartheta_{kalt}).$$

Aus der Temperatur ϑ_{warm} ergibt sich die Erwärmung (= Übertemperatur) $\vartheta_{ü}$, wenn man die Kühlmitteltemperatur (im allgemeinen = Raumtemperatur) davon abzieht:

$$(9) \quad \vartheta_{ü} = \vartheta_{warm} - \vartheta_{Kühlmittel}.$$

Wenn, wie in den meisten Fällen, die Raumluft als Kühlmittel dient, mißt man deren Temperatur in etwa 1 — 2 m Entfernung von der Maschine ungefähr in Höhe der Maschinenmitte. Die dazu verwendeten Thermometer müssen vor Luftströmungen und vor Wärmebestrahlung geschützt werden. Man mißt die Raumlufttemperatur in regelmäßigen Zeitabschnitten und setzt in Gl. 9 den Mittelwert der Messungen aus dem letzten Viertel der Versuchszeit ein (REM § 35).

Nur bei Maschinen für kurzzeitigen Betrieb wird anstatt der Kühlmitteltemperatur die Temperatur der Maschine zu Beginn des Versuches als Ausgangspunkt genommen, d. h. hier bezeichnet man als Erwärmung die Differenz

$$(9a) \quad \vartheta_{ü} = \vartheta_{warm} - \vartheta_{kalt}.$$

Bei Thermometermessungen ist darauf zu achten, daß die Thermometer durch gute Wärmeleiter (Stanniol) fest an die zu messenden Oberflächen angepreßt werden und daß sie gegen Wärmeabgabe an die umgebende Luft durch eine Abdeckung mit einem Bausch Watte oder Putzwolle geschützt werden.

Die Temperaturmessungen am feststehenden Teil der Maschine, insbesondere die Widerstandsmessungen an den Er-

regerwicklungen, können zu beliebiger Zeit auch während des Probelaufes durchgeführt werden. Die Klemmenspannung der Erregerwicklungen ist ja, da eine induzierte Spannung fehlt, stets gleich der Ohmschen Spannung. Der Widerstand der Ankerwicklung kann dagegen nicht gemessen werden, ohne daß die Maschine abgestellt wird. Meist beschränkt man sich deshalb auf die Messung nach Beendigung des Probelaufes. Man muß dann darauf achten, daß man nach dem Abstellen der Maschine möglichst rasch zur Messung kommt, d. h. man muß die Maschine künstlich abbremsen und man muß die Widerstandsmessung so vorbereiten, daß man sofort einschalten kann, wenn die Maschine stillsteht. Ebenso sind auch die Thermometermessungen am Anker und am Stromwender erst nach Beendigung des Probelaufs möglich. Bei allen diesen Messungen empfiehlt es sich, die Temperaturen bzw. Widerstände mehrmals in bestimmten Zeitabständen nach dem Abstellen zu messen, so daß man durch Rückwärts-Extrapolation die Temperatur zur Zeit des Abstellens ermitteln kann.

3. Berechnung der Erwärmung bei Dauerbetrieb

Die Belastbarkeit einer jeden elektrischen Maschine ist durch ihre Erwärmung begrenzt. Bei dieser Bedeutung der Erwärmung muß der Berechner einer Maschine natürlich auch imstande sein, die Erwärmung genügend genau vorher zu berechnen, und er ist im allgemeinen auch überzeugt davon, daß er das kann. Trotzdem kann man behaupten, daß eine wirkliche Berechnung der Erwärmung sehr schwer und nur sehr ungenau möglich ist. Die Berechnung der Erwärmung, wie sie praktisch üblich ist, ist eigentlich nur eine Umrechnung von einer Maschine auf eine andere ganz ähnlicher Bauart. Sie setzt einen Erwärmungsversuch an einer solchen Maschine voraus. Bei einem wirklich grundlegenden Neuentwurf wird deshalb die Belastbarkeit immer erst auf Grund von Messungen an einer Erstausführung endgültig festgelegt.

Die Wärmemenge, die von einem Maschinenteil in der Zeiteinheit abgestrahlt oder durch Leitung (Konvektion) an die umgebende Luft abgeführt werden kann (N_v Watt), ist jedenfalls ungefähr proportional der Oberfläche des Maschinenteils (O cm²) und der Übertemperatur desselben ($\vartheta_ü$ °C); also

$$N_v = h \cdot O \cdot \vartheta_ü. \tag{10}$$

Hier bedeutet h die Wärmeabgabezahl in Watt/cm² · ° C. Diese Größe ist ihrerseits abhängig von der Art der Oberfläche (ob matt oder blank poliert) und von der Geschwindigkeit, mit welcher die Luft über die Oberfläche hinwegstreicht; bei einem sich drehenden Anker also auch von dessen Umfangsgeschwindigkeit, weil von dieser wieder die Relativgeschwindigkeit zwischen Luft und Anker abhängt. Für eine mit Lack überzogene Ankerfläche wird für h die stark ausgezogene Kurve in Bild 24 angegeben.

Diese Kurve kann rechnerisch in dem Bereich zwischen 5 und 25 m/sec entweder durch die Gerade a oder durch die Parabel b angenähert werden; man kann also setzen

$$h = h_0 \cdot (1 + \alpha \cdot v) \tag{11a}$$

oder

$$h = h_0 \cdot (1 + \beta \cdot \sqrt{v}). \tag{11b}$$

Je nachdem, ob man die eine oder die andere Formel wählt, ergibt sich ein anderer Wert für h_0; denn h_0 ist ja nicht die wirkliche Wärmeabgabezahl bei stillstehendem Anker, sondern eine fiktive Rechnungsgröße, insbesondere wenn man die Gerade a, also die Formel 11a benützt.

Aber auch der wirkliche Wert von h ist durch die Kurve in Bild 24 nicht ganz richtig dargestellt; denn diese Kurve ist an einem allseitig in freier Luft umlaufenden Zylinder gewonnen, während der Anker einer Gleichstrommaschine teilweise durch die Pole abgedeckt ist.

Für die Berechnung der Ankererwärmung reicht die Formel 10 in Verbindung mit 11a oder 11b selbst dann nicht

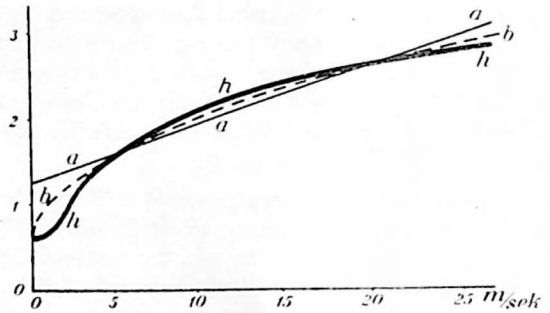

Bild 24. Wärmeabgabezahl der Ankeroberfläche, abhängig von der Umfanggeschwindigkeit.

aus, wenn man die mittlere Wärmeabgabezahl h für die Mantelfläche genau kennen würde; denn ein Teil der Wärme wird auch durch die Stirnflächen (auch an den Lüftungsschlitzen) und die innere Mantelfläche abgeleitet. Dabei ist noch zu berücksichtigen, daß diese Flächen nicht alle gleich warm sind. Insbesondere die Stirnflächen der Blechpakete sind verhältnismäßig kühl, und auch schon an verschiedenen Stellen der äußeren oder inneren Mantelfläche herrschen ganz verschiedene Temperaturen.

Für die Stirnflächen der Blechpakete an den Lüftungsschlitzen fällt auch die Wärmeabgabe durch Strahlung weg; andererseits wird die Wärmeabgabe durch Konvektion an diesen Flächen durch die größere Geschwindigkeit der hier vorbeiströmenden Luft erhöht. Man sucht das alles zu berücksichtigen, indem man diese Flächen mit einem geringeren Gewicht als die äußere Mantelfläche in die Rechnung einsetzt. Je nachdem nun, ob man alle wärmeabgebenden Flächen mehr oder weniger vollständig erfaßt und mit den richtigen Beiwerten, entsprechend ihrer Wirksamkeit, multipliziert, ändert sich der Faktor h in Gleichung 10. Die Angabe einer Wärmeabgabezahl h für praktische Maschinenberechnung hat

also nur dann einen Sinn, wenn gleichzeitig angegeben wird, wie bei ihrer Anwendung die Oberfläche berechnet werden soll.

Wenn im folgenden für die wichtigsten Teile der Gleichstrommaschine Zahlenwerte für h_0 und β nach Gl. 11b angegeben werden, so sind diese Werte als Durchschnittswerte zu betrachten, die etwa für die heute übliche Art der Lüftung gelten. Für Maschinen ohne Lüfter muß man wesentlich kleinere Werte in die Rechnung einsetzen; andererseits wird man durch weitere Verbesserung der Lüftung die Werte wohl auch noch erhöhen können.

Nur mit diesen Einschränkungen können die folgenden Faustregeln empfohlen werden.

Für den Anker rechne man als abkühlende Oberfläche die äußere Mantelfläche einschließlich der Wicklungsausladung, also $\pi \cdot D_a \cdot (L_a + 2 \cdot A)$, und die innere Mantelfläche $\pi \cdot D_i \cdot L_a$, soweit sie vom Luftstrom bestrichen wird, also nicht, wenn die Bleche unmittelbar auf die Welle gesetzt sind. Von den Stirnflächen der Blechpakete, je $\frac{\pi}{4} \cdot (D_a^2 - D_i^2)$ rechne man

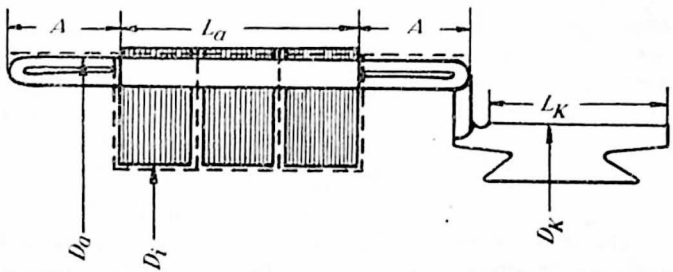

Bild 25. Zur Erwärmungsberechnung des Ankers und Stromwenders.

die beiden äußersten voll, von den einander zugewendeten an den Lüftungsschlitzen dagegen nur eine. In Bild 25 sind die hiernach einzurechnenden Oberflächen durch gestrichelte Linien gekennzeichnet. Dann setze man

$h_0 = 2 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Watt}}{cm^2 \cdot {}^0C}$ und $\beta = 0{,}7$, also

(12a) $$h = 2 \cdot 10^{-3} \cdot (1 + 0{,}7 \cdot \sqrt{v_a}).$$

Für den Stromwender rechne man als abkühlende Oberfläche nur die Schleiffläche $\pi \cdot D_k \cdot L_k$ (Bild 25). Bei Stromwendern mit langen Fahnen muß man auch deren Abkühlungsfläche teilweise berücksichtigen. Ebenso muß man bei besonders gelüfteten Stromwendern, wie sie bei großen Maschinen vorkommen (Bd. I, Bild 16), auch die inneren von Luft bestrichenen Kühlflächen einrechnen. Man setze dann $h_0 = 5 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Watt}}{\text{cm}^2 \cdot {}^0\text{C}}$ und $\beta = 0{,}7$, also

(12b) $$h = 5 \cdot 10^{-3} \cdot (1 + 0{,}7 \cdot \sqrt{v_k}).$$

Auch die Kühlung der Polwicklungen geschieht durch Luft, welche durch den Anker bzw. den mit ihm verbundenen Lüfter in Bewegung gesetzt wird, deren Geschwindigkeit also ebenfalls von der Ankerumfangsgeschwindigkeit v_a abhängig ist. Man kann deshalb auch die Wärmeabgabezahl der Polwicklungen $h = h_0 \cdot (1 + \beta \sqrt{v_a})$ setzen. Man rechne als abkühlende Flächen das arithmetische Mittel aus der von Luft bespülten Oberfläche und der „strahlenden Oberfläche", die in Bild 26 durch die gestrichelte Linie angedeutet ist. Man setze dann $h_0 = 0{,}5 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Watt}}{\text{cm}^2 \cdot {}^0\text{C}}$ und $\beta = 0{,}7$, also

(12c) $$h = 0{,}5 \cdot 10^{-3} \cdot (1 + 0{,}7 \cdot \sqrt{v_a}).$$

Alle diese Formeln erlauben nur eine Berechnung der mittleren Oberflächentemperatur ϑ_0. Bei isolierten Wicklungen muß der Temperaturabfall in der Isolation noch berücksichtigt werden. In den meisten Fällen genügt es, wenn man annimmt, daß die mittlere Erwärmung einer isolierten Wicklung um etwa 25% höher liegt als die Oberflächenerwärmung.

Bei geschlossenen Maschinen kann man nach diesen

Regeln nur die Übertemperatur der Maschinenteile über die Luft im Inneren der Maschine ($\vartheta_{\ddot{u}1}$) berechnen. Dazu kommt aber hier noch die Temperaturdifferenz zwischen der Innenluft und dem Gehäuse ($\vartheta_{\ddot{u}2}$), sowie die zwischen dem Gehäuse und der Außenluft ($\vartheta_{\ddot{u}3}$). $\vartheta_{\ddot{u}1}$ und $\vartheta_{\ddot{u}2}$ werden klein gehalten durch einen Lüfter im Inneren der Maschine, $\vartheta_{\ddot{u}3}$ durch einen Lüfter, der die äußere Oberfläche anbläst (Bd. I, S. 34). $\vartheta_{\ddot{u}1}$ muß, weil es hier nur ein Teil der Gesamterwärmung ist, viel kleiner sein als bei offenen Maschinen. Dementsprechend muß die Leistung geschlossener Maschinen gegenüber der offener Maschinen herabgesetzt werden.

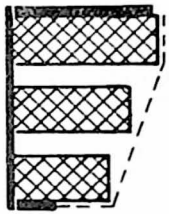

Bild 26. Zur Berechnung der Erwärmung der Polwicklungen.

4. Zeitlicher Verlauf der Erwärmung

Wenn man die Erwärmung $\vartheta_{\ddot{u}}$ irgend eines Punktes in einer Maschine vom Beginn der Belastung an beobachtet, so findet man, daß sie zuerst rasch, dann immer langsamer zunimmt, und sich endlich einem Endwert $\vartheta_{\ddot{u}\,max}$ immer mehr nähert (Bild 27). Bei einer Maschine, die in allen Teilen stets dieselbe Temperatur hätte, müßte diese Kurve eine genaue Exponentialkurve sein

$$\vartheta_{\ddot{u}} = \vartheta_{\ddot{u}\,max}\left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right). \tag{13}$$

Auch wenn eine Maschine, wie das praktisch immer der Fall ist, aus mehreren Teilen mit verschiedener Wärmeabgabefähigkeit, verschiedener Verlustwärme, verschiedener Enderwärmung zusammengesetzt ist, so ist die Erwärmungskurve zwar nicht in ihrem ganzen Verlauf, aber doch wenigstens im letzten Teil angenähert eine Exponentialkurve. Man macht von dieser Eigenschaft der Erwärmungskurve Gebrauch, um die Enderwärmung im Dauerbetrieb zu bestimmen, ohne den

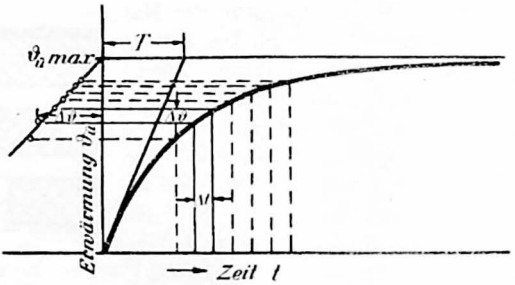

Bild 27. Erwärmungskurve.

Probelauf allzu lange ausdehnen zu müssen. Wenn man nämlich die Erwärmung $\vartheta_{\ddot{u}}$ in gleichen Zeitabständen Δt mißt und die Erwärmungszunahme $\Delta\vartheta$ in Abhängigkeit von der am Anfang des Zeitabschnittes Δt jeweils erreichten Erwärmung aufträgt (man kann auch die Erwärmung am Ende des Zeitabschnittes nehmen), dann liegen die erhaltenen Punkte auf einer geraden Linie (Bild 27), und zwar um so genauer, je mehr die Erwärmungskurve einer Exponentialkurve entspricht. Die Verlängerung dieser Geraden schneidet auf der Erwärmungsachse die Enderwärmung $\vartheta_{\ddot{u}\,max}$ ab. Die Genauigkeit dieses Verfahrens ist mindestens ebenso groß wie die des fortgesetzten Erwärmungsversuches.

In Gl. 13 bedeutet T eine für die Erwärmung der betreffenden Maschine kennzeichnende Zeit, die sog. Zeitkonstante. Sie wird definiert durch den Abschnitt, den die Anfangstangente der Exponentialkurve auf der Linie der Enderwärmung abschneidet. Die anfängliche Zunahme der Temperatur ist aber dadurch bestimmt, daß die kalte Maschine noch keine Wärme nach außen abgibt, also die Verlustarbeit in sich aufspeichert. Ist $c \cdot G$ die Wärmespeicherfähigkeit der Maschine in Wattsec/^{0} C (G = Gewicht in kg, c = mittlere spezifische Wärme in Wattsec/^{0} C · kg), so ist

$$\frac{d\vartheta}{dt} = \frac{\vartheta_{\ddot{u}\,max}}{T} = \frac{N_v}{c \cdot G}. \tag{14}$$

Andererseits ist nach S. 55 die Verlustwärme N_v, die ja im Dauerbetrieb bei der Enderwärmung $\vartheta_{\ddot{u}\,max}$ an die umgebende Luft abgeführt werden muß,

$$N_v = h \cdot O \cdot \vartheta_{\ddot{u}\,max}. \tag{10}$$

Daraus folgt

$$T = (c \cdot G) : (h \cdot O), \tag{15}$$

d. h. die Zeitkonstante ist der Wärmespeicherfähigkeit $c \cdot G$ proportional, der Wärmeabgabefähigkeit $h \cdot O$ umgekehrt proportional.

Die Wärmespeicherfähigkeit wächst mit der Größe der Maschine rascher als die Wärmeabgabefähigkeit. Große Maschinen haben deshalb große Erwärmungs-Zeitkonstanten, bis zu mehreren Stunden. Geschlossene Maschinen haben bei gleicher Wärmespeicherfähigkeit eine viel kleinere Wärmeabgabefähigkeit als offene Maschinen und daher auch eine große Zeitkonstante.

Bei Maschinen für kurzzeitigen Betrieb kommt es auf die anfängliche Zunahme der Temperatur mehr an als auf den Endwert der Erwärmung, der ja bei dieser Betriebsart nie erreicht wird. Hier ist also die Wärmeabgabefähigkeit $h \cdot O$ von geringerer Bedeutung als die Wärmespeicherfähigkeit $c \cdot G$. Geschlossene Maschinen sind daher bei kurzzeitigem Betrieb verhältnismäßig besser ausnützbar als bei Dauerbetrieb, d. h. ihre Leistung braucht gegenüber der der offenen Maschine bei kurzzeitigem Betrieb weniger herabgesetzt zu werden.

Bei dem aussetzenden Betrieb, der praktisch viel häufiger vorkommt als der kurzzeitige Betrieb, wechseln Einschaltzeiten (Belastungszeiten) mit Betriebspausen in regelmäßiger Folge ab. Die gesamte „Spieldauer" setzt sich aus Belastungszeit und Betriebspause zusammen. Der aussetzende

Betrieb wird gekennzeichnet durch die sog. relative Einschaltdauer, d. h. das Verhältnis der Belastungszeit zur Spieldauer. Während der Belastungszeit steigt die Temperatur nach der Erwärmungskurve E (Bild 28), während der Betriebspause sinkt sie nach der Abkühlungskurve A, die ebenfalls angenähert eine Exponentialkurve ist.

Wenn die Maschine während der Betriebspause leer weiter läuft, ist die Abkühlungskurve ungefähr das Spiegelbild der

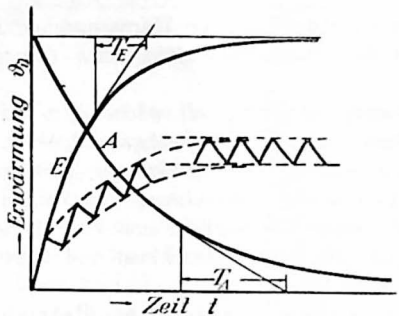

Bild 28. Aussetzender Betrieb.

Erwärmungskurve. Steht die Maschine während der Betriebspause still, dann ist ihre Kühlung schlechter, also ihre Wärmeabgabefähigkeit verkleinert; die Zeitkonstante der Abkühlungskurve ist dann wesentlich größer als die der Erwärmungskurve.

Aus Erwärmungs- und Abkühlungskurve kann man den Verlauf der Erwärmung bei aussetzendem Betrieb konstruieren (Bild 28). Nach längerer Zeit stellt sich ein Endzustand ein, bei dem die Zunahme der Erwärmung in der Belastungszeit ebenso groß ist wie die Abkühlung in der Betriebspause.

Näheres über kurzzeitigen und aussetzenden Betrieb siehe Schwaiger, Elektromotorische Antriebe, Sammlung Göschen Nr. 827.

IV. Die Größenbemessung

1. Allgemeine Grundsätze

Jede elektrische Maschine muß so bemessen werden, daß die zulässige Erwärmung nicht überschritten wird. Daneben ist natürlich auch auf andere Betriebserfordernisse Rücksicht zu nehmen, bei Gleichstrommaschinen insbesondere auf funkenfreie Stromwendung. In früheren Zeiten konnte manche Gleichstrommaschine nicht so hoch belastet werden, wie es mit Rücksicht auf die Erwärmung zulässig gewesen wäre, weil die Funkenbildung am Stromwender schon vorher eine Grenze setzte. Beim heutigen Stande des Elektro-Maschinenbaues ist aber die Funkengrenze nur noch maßgebend für die größte Leistung, für die eine Gleichstrommaschine bei gegebener Drehzahl überhaupt gebaut werden kann, und für die höchste Spannung, die bei einer Maschine bestimmter Größe zulässig ist, während die Abmessungen normaler Maschinen nur durch die Erwärmung bedingt sind.

Auch der Wirkungsgrad hat beim heutigen Stande der Technik im allgemeinen keinen Einfluß auf die Größenbemessung. Wohl wäre es möglich, bei einer in üblicher Weise gebauten Maschine durch Vergrößerung der Abmessungen den Wirkungsgrad etwas zu verbessern; der dadurch entstehende Mehraufwand an Herstellungskosten ist aber fast immer zu groß, als daß diese „unnatürliche" Erhöhung des Wirkungsgrades sich lohnen würde.

So findet das Bestreben des Maschinenberechners, die Herstellungskosten so gering wie möglich zu halten, seine Grenze heute nur in der Erwärmung der Maschine.

Die Kosten einer elektrischen Maschine setzen sich zusammen aus Baustoffkosten, Löhnen und Unkosten. Bei gegebenen Baustoffkosten ist die Verringerung der Löhne Sache des konstruktiven Entwurfs, die Verringerung der Unkosten Sache der Fabrikorganisation. Die Baustoffkosten dagegen

sind im wesentlichen durch die berechneten Abmessungen einer Maschine bedingt; bei der Berechnung ist daher ein Minimum an Baustoffkosten anzustreben. Eine Verringerung der Baustoffkosten wird im allgemeinen von selbst auch die Löhne und Unkosten sinken lassen.

Von den Baustoffkosten wieder kommt bei der Berechnung nur der arbeitende (aktive) Teil in Betracht, also das stromdurchflossene Kupfer und das magnetisch beanspruchte Eisen. Denn bei gegebenen Abmessungen dieser Teile können die Kosten der anderen (inaktiven) Maschinenteile durch geschickten konstruktiven Aufbau, also unabhängig von der Berechnung, klein gehalten werden.

2. Die Entwurfsgleichung

Die Baustoffkosten des aktiven Teiles sind bei allen elektrischen Maschinen im wesentlichen durch einige wenige Abmessungen festgelegt, die man als „Hauptabmessungen" bezeichnet. Bei Gleichstrommaschinen sind dies der Ankerdurchmesser D und die Ankereisenlänge L. Andere Abmessungen, die davon mehr oder weniger unabhängig sind, wie Jochdurchmesser und Stromwenderlänge, müssen jede für sich so klein wie möglich gewählt werden.

Maßgebend für die Größe des Ankers ist die sog. „innere Leistung" N_i, d. h. das Produkt aus der induzierten Spannung E und dem Ankerstrom I_a. Die innere Leistung ist stets etwas größer als die abgegebene Leistung. Bei Stromerzeugern schließt sie den Stromwärmeverlust in Anker- und Erregerwicklung und den Übergangsverlust am Stromwender ein, nicht aber den Eisen- und Reibungsverlust. Bei Motoren schließt sie umgekehrt den Eisen- und Reibungsverlust ein, nicht aber die Stromwärmeverluste. Denn die induzierte Spannung E unterscheidet sich von der Klemmenspannung U um die Ohmsche Spannung im Anker und in den mit ihm in Reihe geschalteten Wicklungen, deren Widerstand hier insgesamt

mit R bezeichnet sei, und um die Übergangsspannung am Stromwender u_b:

$$E = U \pm I_a \cdot R \pm u_b, \tag{16}$$

und der Ankerstrom I_a unterscheidet sich vom Gesamtstrom I der Maschine um den Strom in der Nebenschlußwicklung i_e:

$$I_a = I \pm i_e. \tag{17}$$

In beiden Gleichungen gilt das Pluszeichen für den Stromerzeuger, das Minuszeichen für den Motor.

Die innere Leistung ist demnach beim Stromerzeuger

$$N_i = (U + I_a \cdot R + u_b) \cdot (I + i_e) = \tag{18}$$
$$= U \cdot I + U \cdot i_e + R \cdot I_a^2 + u_b \cdot I_a = N + V_{err} + V_k + V_{\ddot{u}},$$

dagegen beim Motor

$$N_i = (U - I_a \cdot R - u_b) \cdot (I - i_e) = \tag{18a}$$
$$= U \cdot I - U \cdot i_e - R \cdot I_a^2 - u_b \cdot I_a =$$
$$= N_{el} - V_{err} - V_k - V_{\ddot{u}} = N_{\text{mech}} + V_r + V_e.$$

Eine Beziehung zwischen der Leistung N_i und den Abmessungen des Ankers erhält man, wenn man die induzierte Spannung E durch Fluß und Windungszahl ausdrückt. Denn der Fluß ist abhängig von der Polfläche, also von den Abmessungen, und die Windungszahl multipliziert mit dem Ankerstrom gibt die gesamte Durchflutung des Ankerumfangs, die dem Ankerdurchmesser proportional ist. Setzt man nach Bd. I, Gl. 8 (S. 45) $E = 4 \cdot f \cdot \Phi \cdot w_a$ (der immer nur wenig von 1 abweichende Faktor ξ soll hier $= 1$ gesetzt werden) und $f = p \cdot \frac{n}{60}$, dann ist

$$N_i = 4 \cdot p \cdot \frac{n}{60} \cdot \Phi \cdot w_a \cdot I_a = \frac{n}{60} \cdot (2p \cdot \Phi) \cdot (2w_a \cdot I_a). \tag{19}$$

Φ ist der Fluß eines Poles in Weber (Voltsec), also $2p \cdot \Phi$ die gesamte magnetische Durchflutung der Ankeroberfläche. w_a ist die Zahl der in Reihe geschalteten Windungen (Bd. I, Gl. 7),

also $2w_a \cdot l_a$ die gesamte elektrische Durchflutung des Ankerumfangs. Diese beiden Durchflutungen sind proportional den Abmessungen (Polfläche bzw. Ankerumfang) und den Beanspruchungen (magnetische Induktion im Luftspalt B_l und Strombelag A). Wenn man die Luftinduktion B_l in Gauß rechnet, den Fluß Φ in Weber, dann ist

$$\Phi = \alpha_i \cdot t_p \cdot L_i \cdot B_l \cdot 10^{-8}$$

(Bd. I, Gl. 17, S. 62). Da der Ankerumfang $\pi \cdot D_a = 2p \cdot t_p$ ist, so wird

$$2p \cdot \Phi = (\pi \cdot D_a) \cdot L_i \cdot \alpha_i \cdot B_l \cdot 10^{-8}.$$

Daß in dieser Gleichung statt der Ankereisenlänge L oder der gesamten Ankerlänge L_a die ideelle Länge L_i vorkommt, ist bedeutungslos, da diese drei Längen sich nur wenig voneinander unterscheiden (Bd. I, Gl. 16 und Bild 37, S. 61).

Ferner ist $2w_a \cdot I_a = \pi \cdot D_a \cdot A$ (Bd. I, Gl. 11, S. 54). Damit wird

$$(20) \qquad N_i = \frac{n}{60} \cdot (\pi \cdot D_a)^2 \cdot L_i \cdot \alpha_i \cdot B_l \cdot A \cdot 10^{-8}.$$

Könnte man die Beanspruchungen A (Strombelag) und B_l (Luftinduktion) als konstant betrachten, dann wäre auch

$$(20a) \qquad N_i/n = C \cdot D_a^2 \cdot L_i.$$

Die Größe C oder eine ihr proportionale oder reziproke Größe wird von verschiedenen Autoren als „Maschinenkonstante" bezeichnet. Besser ist die Bezeichnung „Ausnützungszahl", denn die Beanspruchungen A und B_l und mit ihnen die Ausnützungszahl C sind durchaus nicht konstant.

Einen noch besseren Einblick in die Zusammenhänge gewinnt man, wenn man die Ausnützungszahl C auf die mittlere Umfangskraft je cm² Ankeroberfläche zurückführt. Nach Gl. 19 oder 20 ist ja nicht die Leistung allein für die Abmessungen maßgebend, sondern der Quotient Leistung durch Drehzahl, also das Drehmoment. Wir wollen das Drehmoment, welches der inneren Leistung N_i bei der Drehzahl n entspricht,

als „inneres Drehmoment" M_i bezeichnen (vgl. S. 21). Da dieses Drehmoment nach Gl. 20 dem Ausdruck $(\pi \cdot D_a)^2 \cdot L_i$ proportional ist, so ist die ihm entsprechende Umfangskraft dem Produkt $(\pi \cdot D_a) \cdot L_i$, also der Oberfläche des Ankers proportional. Man kann deshalb mit einer mittleren Umfangskraft je cm² Ankeroberfläche rechnen. Diese Größe nennt man nach Emde den „mittleren Drehschub". Wir bezeichnen ihn mit σ.

Gehen wir von diesem mittleren Drehschub σ (kg/cm²) aus, dann ist die Umfangskraft $(\pi \cdot D_a) \cdot L_i \cdot \sigma$ und das Drehmoment

$$M_i = \tfrac{1}{2} \cdot D_a \cdot (\pi \cdot D_a) \cdot L_i \cdot \sigma. \tag{21}$$

Setzt man hier alle Maße in cm ein, so erhält man M_i in emkg. Die Leistung N_i in Watt ist dann

$$N_i = \frac{2\pi \cdot n}{60} \cdot M_i \cdot \frac{9{,}81}{100}$$

oder

$$N_i = \frac{n}{60} \cdot (\pi \cdot D_a)^2 \cdot L_i \cdot \sigma \cdot \frac{9{,}81}{100}. \tag{22}$$

Aus dem Vergleich der Gl. 20 mit der Gl. 22 ergibt sich

$$\sigma = \frac{\alpha_i \cdot B_l \cdot A}{9{,}81 \cdot 10^6}. \tag{23}$$

Der mittlere Drehschub, also die Ausnützung der Maschine, ist hiernach von der magnetischen und elektrischen Beanspruchung abhängig, die durch die Luftinduktion B_l und den Strombelag A gekennzeichnet werden.

Wenn die zulässigen Beanspruchungen festliegen, dann kann nach Gl. 20 das Produkt $D_a^2 \cdot L_i$ berechnet werden, welches für die Hauptabmessungen der Maschine maßgebend ist. Dadurch wird der Entwurf von Maschinen ohne Probieren, also durch einen folgerichtigen Rechnungsgang, möglich. Wir nennen deshalb die Gl. 20 oder das ihr gleichwertige Gleichungspaar 22 und 23 die Entwurfsgleichung der Gleichstrom-

maschine. Sie gilt übrigens mit ganz geringfügigen Änderungen auch für andere elektrische Maschinen.

Die Entwurfsgleichung läßt vor allem auch erkennen, daß die Größe einer elektrischen Maschine nicht durch die Leistung, sondern nur durch das Drehmoment eindeutig bestimmt ist. Um eine Maschine entwerfen zu können, muß also neben der Leistung auch die Drehzahl gegeben sein. Ist die Drehzahl nicht vorgeschrieben, so wählt man sie so, daß die Ankerumfangsgeschwindigkeit bei kleineren und mittleren Maschinen 20—25 m/sec beträgt, bei großen Maschinen auch bis zu 40 oder 50 m/sec. Bei noch höheren Drehzahlen würde die konstruktive Ausführung von der gebräuchlichen abweichen müssen und dadurch teurer werden. Außerdem würde durch die höhere Ummagnetisierungsfrequenz der Eisenverlust steigen, und die Stromwendung würde schwieriger werden. Beides bedingt eine Herabsetzung der Beanspruchungen, so daß die Leistung nicht mehr proportional der Drehzahl, sondern viel langsamer steigen würde. Die teurere konstruktive Ausführung lohnt sich deshalb nur in seltenen Fällen.

Im praktischen Elektro-Maschinenbau entwirft man keine Einzelmaschinen, sondern Typenreihen, bei denen das Drehmoment jeder Type um einen bestimmten Prozentsatz (beispielsweise bei den kleinen Typen je 40%, bei den großen je 25%) höher liegt als das der vorhergehenden Type. Für jede Type wird eine normale Drehzahl festgelegt. Diese wird in den Listen vorzugsweise angegeben, wenngleich zur Bequemlichkeit der Abnehmer auch die Leistungen bei anderen Drehzahlen oft in den Listen mit angeführt werden. Bei Drehzahlen, die unter der Normaldrehzahl liegen, sinkt die Leistung proportional mit der Drehzahl, bei erheblichen Abweichungen von der normalen Drehzahl sogar noch stärker, weil mit sinkender Drehzahl die Kühlung schlechter und damit die zulässige Ausnützung kleiner wird. Bei Drehzahlen über der

Normaldrehzahl steigt die Leistung zunächst auch noch fast proportional der Drehzahl, bald aber aus den oben erwähnten Gründen weniger als proportional. Auch darf für normal gebaute Maschinen eine gewisse Grenzdrehzahl aus Gründen der mechanischen Sicherheit (Fliehkraftbeanspruchung) nicht überschritten werden.

3. Die Beanspruchungen

Als Maß für die Beanspruchungen, durch welche die Ausnützung der Maschine bedingt ist, erscheinen in der Entwurfsgleichung die magnetische Induktion im Luftspalt B_l und der Strombelag des Ankerumfangs A. Nun ist es zwar eigentlich nicht die Induktion im Luftspalt, die an eine bestimmte Grenze gebunden ist, sondern vielmehr die Induktionen in den Eisenteilen, vor allem die in den Ankerzähnen. Aber je größer die Luftinduktion wird, desto größer muß natürlich die Zahninduktion werden. — Ebenso scheint zunächst nicht der Strombelag, sondern die Stromdichte im Ankerkupfer das richtige Maß für die Beanspruchung, d. h. für die Erwärmung zu sein. Tatsächlich läßt sich zeigen, daß für den in die Nuten eingebetteten Teil der Ankerwicklung das Produkt aus Stromdichte und Strombelag maßgebend ist, d. h. daß bei Nuten mit sehr geringer Tiefe und bei dementsprechend geringem Strombelag eine höhere Stromdichte zulässig ist. Da nun nach der Entwurfsgleichung die Leistung mit dem Strombelag wächst, so macht man die Nuten so tief, wie aus anderen Gründen zulässig ist, um einen großen Strombelag bei kleiner Stromdichte darin unterbringen zu können. Bei gegebener Nutentiefe wächst aber die Stromdichte proportional mit dem Strombelag, so daß man den Strombelag allein als Maß für die Beanspruchung gelten lassen kann.

Die Grenze für die Nutentiefe ist bei kleinen Maschinen dadurch gegeben, daß bei konstanter Zahnbreite b_z die Nutenweite b_n um so kleiner werden muß, je tiefer die Nut wird

(Bild 29). Der ausnützbare Nutenraum wächst deshalb mit der Nutentiefe nur bis zu einer gewissen Grenze, darüber hinaus nimmt er wieder ab. Berücksichtigt man noch, daß mit

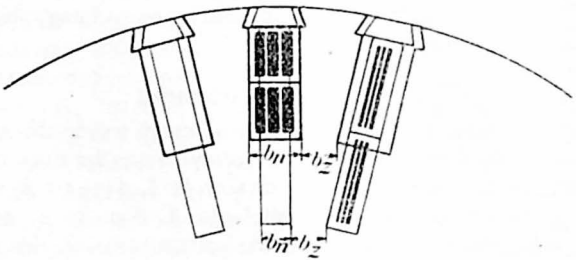

Bild 29. Änderung des Nutenraumes mit der Nutentiefe

wachsender Nutentiefe die Stromdichte kleiner werden muß, so ergibt sich als günstigster Wert der Nutentiefe etwa $^1/_8$ bis $^1/_{10}$ des Ankerdurchmessers.

Bei größeren Maschinen muß auch beachtet werden, daß die Stromwendung durch allzu tiefe Nuten erschwert wird, und daß der Wirbelstromverlust, der infolge der Stromwendung im Ankerkupfer entsteht (S. 40), mit wachsender Nutentiefe zunimmt. Man macht deshalb die Nuten selten tiefer als 40—50 mm.

Wenn man bei gegebener Nutentiefe die Nutenweite vergrößert, so daß man mehr Kupfer in der Nut unterbringen kann, dann kann der Strombelag erhöht werden. Dabei wird aber die Zahnbreite kleiner und die Luftinduktion muß dementsprechend herabgesetzt werden. Diese Verkleinerung von B_l kann nur in engen Grenzen durch die Vergrößerung von A ausgeglichen werden, und ebenso umgekehrt. Das günstigste Verhältnis von A zu B_l ist dann erreicht, wenn die Zahnstärke b_z am Nutengrunde etwas kleiner ist als die Nutenweite b_n (Bild 29).

Mit wachsendem Ankerdurchmesser steigt sowohl der zulässige Strombelag als auch die zulässige Luftinduktion. Denn je kleiner der Ankerdurchmesser wird, desto mehr verjüngen sich die Zähne und desto kleiner wird bei gegebener Nutenteilung sowohl die Zahnstärke am Nutengrund als auch die Nutenweite. Da bei kleinerem Ankerdurchmesser auch die Nutentiefe kleiner wird, so muß besonders der Strombelag bei kleinen Maschinen fast proportional mit dem Ankerdurchmesser abnehmen. Die Abhängigkeit der zulässigen Beanspruchungen A und B_l vom Ankerdurchmesser zeigt Bild 30.

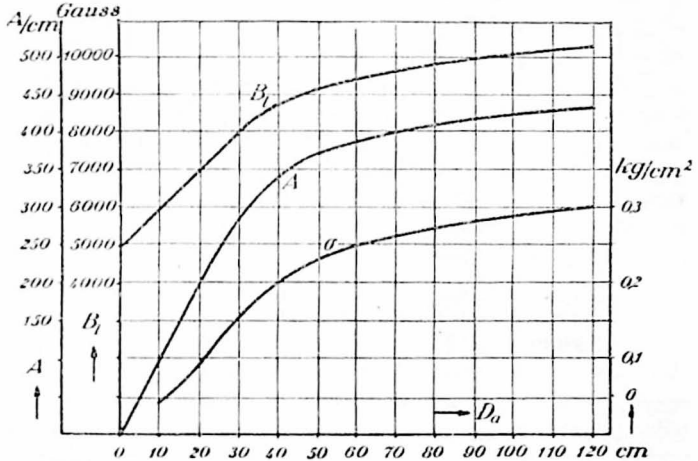

Bild 30. Ausnutzungszahlen.

Mit dem üblichen Polbedeckungsfaktor $\alpha_i = \frac{2}{3}$ ergibt sich aus diesen Werten nach Gl. 23 die in Bild 30 eingetragene Kurve des mittleren Drehschubs.

Die in Bild 30 angegebenen Werte gelten für den Dauerbetrieb normaler, gut gelüfteter Maschinen mit Wendepolen bei den üblichen Drehzahlen. Bei stärkerer Abweichung von

der üblichen Drehzahl müssen die Beanspruchungen herabgesetzt werden (vgl. S. 68). Auch bei hohen Spannungen ist manchmal eine Herabsetzung notwendig, weil eine Ankerwicklung mit vielen dünnen Drähten verhältnismäßig mehr Isolation benötigt, so daß der Füllfaktor der Nut schlechter wird. Bei eigentlichen Hochspannungsmaschinen ist der zulässige Strombelag nicht durch die Erwärmung, sondern durch die Funkenbildung begrenzt und liegt viel niedriger als bei normalen Maschinen. Bei geschlossenen Maschinen mit ihrer schlechteren Kühlung (S. 58) müssen die Beanspruchungen gegenüber den Werten von Bild 30 sehr erheblich herabgesetzt werden. Allgemein gültige Zahlenwerte lassen sich hier schwer angeben. Bei geschlossenen Maschinen ist die Ausnützung auch viel stärker von der Drehzahl abhängig als bei offenen Maschinen. Denn mit höherer Drehzahl steigen die Verluste, ohne daß dabei gleichzeitig, wie bei den offenen Maschinen, auch die Wärmeabgabezahl zunehmen würde. Geschlossene Maschinen sollen deshalb im allgemeinen langsamer laufen als offene (Ankerumfangsgeschwindigkeit 10—15 m/sec gegenüber 15—25 m/sec bei den offenen Maschinen).

4. Regeln des Ebenmaßes

Auch wenn man die zulässigen Beanspruchungen kennt, kann man aus der Entwurfsgleichung keine einzelnen Abmessungen, sondern nur das Produkt $D_a^2 \cdot L_i$ berechnen. Die Aufteilung dieses Produktes ist bis zu einem gewissen Grade willkürlich. Doch sind Maschinen mit ungewöhnlich großem Ankerdurchmesser bei kleiner Ankereisenlänge oder solche mit ungewöhnlich großer Eisenlänge bei kleinem Durchmesser unwirtschaftlich. Man hält sich daher bei der Wahl des Verhältnisses von Durchmesser zu Länge an gewisse Erfahrungsregeln. Ebenso ist die Polzahl nur durch Erfahrungsregeln bestimmt. Alle diese Regeln sollen als „Regeln des Ebenmaßes" bezeichnet werden. Sie brauchen nicht genau eingehalten zu werden; nur größere Abweichungen sind schädlich.

Die Ankerlänge richtet sich nach der Polteilung und soll im Mittel 75% derselben betragen (60%—100% kommt jedoch häufig vor). Wird die Ankerlänge zu groß, so erhält man einen ungünstigen Polkernquerschnitt; wird sie zu klein, so erhält man lange Stirnverbindungen im Verhältnis zur Ankerlänge.

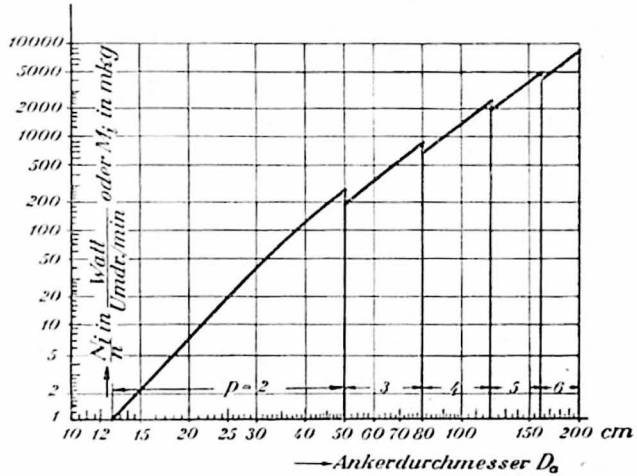

Bild 31. Wahl des Ankerdurchmessers.

Die Polzahl soll nicht zu klein sein (also die Polteilung nicht zu groß), weil eine große Polteilung die Ankerrückwirkung erhöht und dadurch auch große und schwer zu kühlende Erregerspulen bedingt. Auch das Ankerkupfergewicht wird größer als nötig wegen der langen Stirnverbindungen, und besonders wird der Jochquerschnitt größer und mit ihm das Eisengewicht der Maschine, wegen des großen Flusses je Pol. Andererseits soll die Polzahl auch nicht zu groß sein, weil dadurch die Ummagnetisierungsfrequenz und mit ihr der Eisenverlust steigen würde. Bei normalen Maschinen wählt man deshalb etwa die aus Bild 31 zu entnehmenden Polzahlen,

die bei größeren Maschinen eine Polteilung von etwa 50 cm ergeben, bei den kleineren vierpoligen Maschinen dagegen Polteilungen von 10 . . . 40 cm. Nur bei besonders hohen Spannungen wählt man manchmal eine niedrigere Polzahl und baut sogar zweipolige Maschinen trotz der schwierigeren Herstellung der Ankerwicklung.

Wenn man sich an diese Regeln des Ebenmaßes hält, dann ist mit dem Ankerdurchmesser auch die Polzahl und die Polteilung, und mit dieser auch die Ankerlänge festgelegt. Da andererseits auch der mittlere Drehschub oder die Ausnützungszahl im wesentlichen vom Ankerdurchmesser abhängt (Bild 30), so ist der Quotient $N_i : n$ oder das Drehmoment der Maschine im wesentlichen schon durch den Ankerdurchmesser bestimmt. Bild 31 zeigt die hiernach berechneten Werte von $N_i : n$ in Abhängigkeit vom Ankerdurchmesser. Nimmt man weiter auch noch eine bestimmte normale Ankerumfangsgeschwindigkeit an und bestimmt man dadurch für jede Type (jeden Ankerdurchmesser) die normale Drehzahl, so erhält man auch die Leistung N_i für jede Type.

5. Die Typenreihe

Eine Typenreihe besteht aus Maschinen ähnlichen Aufbaues und wachsender Größe. Man kann eine Typenreihe natürlich nicht von den kleinsten Maschinen mit Leistungen von wenigen Watt bis zu den allergrößten mit Tausenden von Kilowatt durchführen. Es zeigen sich vielmehr in diesem weiten Leistungsbereich zwei charakteristische Einschnitte, durch die drei Leistungsbereiche voneinander getrennt werden, nämlich: 1. die kleinen zweipoligen Maschinen mit Leistungen bis zu einigen wenigen kW, 2. die mittleren vierpoligen Maschinen mit Leistungen von etwa 1 kW bis zu 100 kW und darüber, 3. die großen mehrpoligen Maschinen mit Leistungen von mehr als 100 kW bis an die 10000 kW.

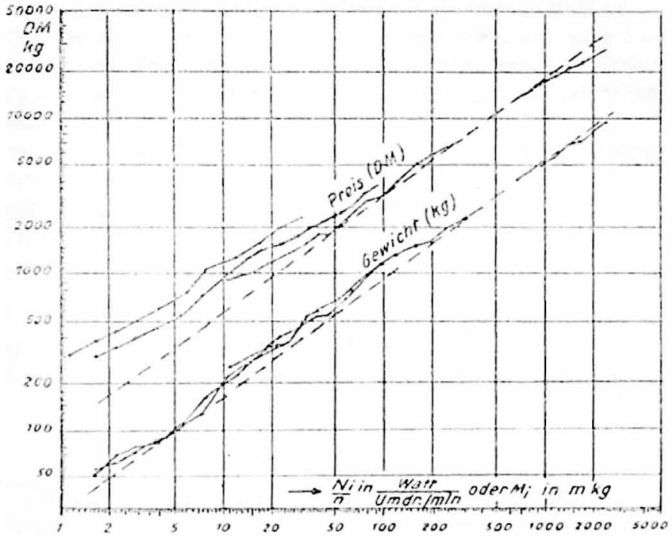

Bild 32. Gewichte und Preise listenmäßiger Gleichstrommaschinen.

Für eine solche Typenreihe lassen sich gewisse Gesetze über das Anwachsen der Leistung und des Gewichtes mit der Größe (gekennzeichnet durch den Ankerdurchmesser) aufstellen. Im Bereich der mittleren (vierpoligen) Maschinen wachsen Polteilung und Länge mit dem Durchmesser. Nach Bild 30 steigt hier (d. h. bei Ankerdurchmessern bis zu 50 cm) auch der mittlere Drehschub angenähert proportional mit dem Ankerdurchmesser. Das Drehmoment ist proportional $D_a \cdot L \cdot \sigma$; es wächst also mit der vierten Potenz des Ankerdurchmessers oder der Ankerdurchmesser mit der vierten Wurzel aus dem Drehmoment: $D_a = C \cdot M^{0,25}$. Das Gewicht wächst dagegen mit der dritten Potenz der linearen Abmessungen, also $G = C \cdot M^{0,75}$.

In Bild 32 sind die Gewichte listenmäßiger Maschinen von ~ 1 mkg bis 2500 mkg dargestellt; die eingezeichnete gestrichelte Linie zeigt, daß das angegebene Potenzgesetz bis auf kleine zufällige Abweichungen wirklich gültig ist.

Auch die listenmäßigen Preise, die in Bild 32 ebenfalls eingetragen sind, zeigen einen ähnlichen Verlauf. Doch sind hier die Abweichungen von dem theoretischen Potenzgesetz etwas größer, weil eben die Preise nicht nur durch die Kosten der aktiven Baustoffe bedingt sind, sondern auch durch die Löhne, die bei den kleinen Typen verhältnismäßig mehr ausmachen.

V. Berechnungsbeispiel

Gleichstrom-Motor N = 50 kW, n = 970 U/min, U = 220 Volt

1. Hauptabmessungen

Um die innere Leistung zu finden, schätzen wir den Wirkungsgrad: $\eta = 89\%$ (nach Bild 23). Die aufgenommene Leistung ist danach $N_{el} = N : \eta = 56{,}2$ kW, der aufgenommene Strom $I = N_{el} : U = 255$ Amp.

Von den Verlusten $V = 6{,}2$ kW entfallen nach Schätzung etwa 50% auf den Ankerstromkreis (Stromwärmeverlust in Anker und Wendepolwicklung, Bürstenübergangsverlust und Zusatzverlust $V_k + V_{\ddot{u}} + V_z = 3{,}1$ kW), der Rest zu etwa gleichen Teilen auf Erregerverlust, Eisenverlust und Reibungsverlust: $V_{err} = 1{,}1$ kW, $V_e = 1$ kW, $V_r = 1$ kW.

Wir schätzen hiernach auch gleich den Erregerstrom $i_e = V_{err} : U = 5$ Amp. und berechnen danach den Strom im Ankerstromkreis $I_a = I - i_e = 250$ Amp.

Ebenso schätzen wir den Spannungsabfall im Ankerstromkreis = 3,1 kW: 250 Amp. = 12,5 Volt.

Die innere Leistung ist nach Gl. 18a

$N_i = N + V_r + V_e = 52$ kW. Für $\frac{N_i}{n} = \frac{52000}{970} = 53{,}5$

entnehmen wir aus Bild 31 den Ankerdurchmesser $\mathbf{D_a = 32\ cm}$ und die dazu passende Polzahl $\mathbf{2p = 4}$. Damit liegt auch schon fest:

$$\text{Die Polteilung } t_p = \frac{D_a \cdot \pi}{2p} = 25{,}1 \text{ cm},$$

die Ankerumfangsgeschwindigkeit $v_a = D_a \cdot \pi \cdot \frac{n}{60} = 16{,}25\ \frac{\text{m}}{\text{sec}}$,

die Ummagnetisierungsfrequenz $f = p \cdot \frac{n}{60} = 32{,}3$ Hz.

Nach Bild 30 sind die zulässigen Beanspruchungen für eine Maschine dieser Größe: $B_l = 8200$ Gauß und $A = 300$ A/cm. Nach Gl. 23 wird der mittlere Drehschub (mit $\alpha_i = {}^2/_3$)

$$\sigma = \frac{\alpha_i \cdot B_l \cdot A}{9{,}81 \cdot 10^6} = 0{,}167 \text{ kg/cm}^2.$$

Aus der Entwurfsgleichung (22) ergibt sich jetzt die erforderliche Länge $L_i = \frac{N_i}{(\pi D_a)^2 \cdot \sigma} \cdot \frac{60}{n} \cdot \frac{100}{9{,}81} = 19{,}5$ cm.

Wir wählen eine Ausführung mit zwei Lüftungsschlitzen je 1 cm ($L_v = 2$ cm), also mit drei Blechpaketen (Bd. I, Bild 37). Machen wir jedes Blechpaket 6,5 cm lang, so wird $\mathbf{L = 19{,}5\ cm}$ und $\mathbf{L_a = L + L_v = 21{,}5\ cm}$. Die Pole lassen wir auf jeder Seite um 1 cm zurückstehen, wir machen also $\mathbf{L_p = 19{,}5\ cm}$. Damit wird nach Gl. 16 (Bd. I) $L_i = 19{,}5$ cm.

2. Der Anker

a) Wicklungsschema

Aus der gewählten Luftinduktion $B_l = 8200$ Gauß ergibt sich der magnetische Fluß je Pol $\Phi = \alpha_i \cdot t_p \cdot L_i \cdot B_l = {}^2/_3 \cdot 25{,}1 \cdot 19{,}5 \cdot 8200 = 2{,}68 \cdot 10^6$ Maxwell (26,8 m Weber).

Die in der Ankerwicklung zu induzierende Spannung ist nach dem geschätzten Spannungsabfall

$$E = U - I_a \cdot R = 220 - 12{,}5 = 207{,}5 \text{ Volt.}$$

Aus der Spannungsgleichung (Bd. I, Gl. 8) ergibt sich die erforderliche Windungszahl:

$$w_a = \frac{E}{4 \cdot f \cdot \Phi} = \frac{207{,}5}{4 \cdot 32{,}3 \cdot 26{,}8 \cdot 10^{-3}} = 60.$$

Um die Wicklungsart zu finden, müssen wir die Grenzen der ausführbaren Stromwenderstegzahl und Nutenzahl kennen. Wir legen deshalb zunächst den Stromwenderdurchmesser D_k fest. Er soll etwas kleiner sein als der Ankerdurchmesser, aber doch so groß, daß auch für hohe Spannungen genügend viele Stromwenderstege unterzubringen sind. Wir entscheiden uns für $D_k = 24$ cm. Nach Bd. I, S. 52 ist dann ausführbar $k_{max} \approx 168$ (Teilung $t_k = 4{,}5$ mm) und $Z_{max} \approx 67$ (Teilung $t_n = 15$ mm). Die Mindestnutenzahl ist $Z_{min} \approx 40$ (10 je Pol), die Mindeststegzahl $k_{min} \approx 80$ (20 je Pol). Die durch die Stegspannung bedingte untere Grenze der Stegzahl kommt bei der kleinen Gesamtspannung nicht in Betracht.

Da die erforderliche Windungszahl w_a größer ist als die höchstmögliche Stromwenderstegzahl je Pol, so ist eine einfache Schleifen-Stabwicklung nicht möglich. Wir wollen deshalb eine Wellenwicklung ausführen ($a = 1$) und können dann bei der Stabwicklung ($w = 1$) bleiben, da $2w_a$ nicht größer ist als die größte mögliche Stromwenderstegzahl. Die erforderliche Stromwenderstegzahl ergibt sich nun aus der Formel für die Windungszahl (Bd. I, Gl. 7) $k = w_a \cdot \frac{2a}{w} = 120$.

Mit Rücksicht auf die Wicklungsformel (Bd. I, Gl. 4b) muß die Stromwenderstegzahl k und mit ihr auch $u = k:Z$ eine ungerade Zahl sein. Mit Rücksicht auf die Nutenzahl, die zwischen 40 und 67 liegen soll, muß $u = 3$ gewählt werden. Also muß k auch durch 3 teilbar sein. Wir wählen: $\mathbf{k = 123}$, $\mathbf{Z = 41}$. Damit wird $w_a = \frac{k \cdot w}{2a} = 61{,}5$, $\Phi = 2{,}61 \cdot 10^6$ Mw $B_l = 8000$ Gauß und der Strombelag

$$A = \frac{2 \cdot w_a \cdot I_a}{\pi \cdot D_a} = \frac{2 \cdot 61{,}5 \cdot 252}{\pi \cdot 32} = 306 \text{ A/cm}.$$

Die mittlere Stegspannung wird
$u_{st\ \text{mittel}} = 2 \cdot p \cdot U : k = 7$ Volt, also recht niedrig.

Der Wicklungsschritt wird $y = \frac{k \pm a}{p} = \frac{123 - 1}{2} = 61$.

Den ersten Teilschritt (die Spulenweite), der $y_1 \approx \frac{k}{2p} = 30{,}75$ sein soll, wählen wir zu $y_1 = 31$. Daß y_1 nicht durch u teilbar ist, daß also eine Treppenwicklung entsteht, stört uns nicht, weil die Stabwicklung ohne Schwierigkeit als Treppenwicklung ausführbar ist. Die Stäbe sind somit zu verbinden in der Reihenfolge:

Oberstab	1		62		123		61		122	usw.
Unterstab		32		93		31		92		

b) Nutenabmessungen

Einen brauchbaren Wert für die Nutentiefe h_n erhält man aus der Faustformel $h_n = 6 \text{ cm} \cdot \frac{D_a}{D_a + 30 \text{ cm}}$. Nach dieser Formel wird hier für $D_a = 32$ cm, $h_n = 3{,}1$ cm. Wir wählen $\mathbf{h_n = 30\ mm}$.

Die Nutenteilung beträgt

am Zahnkopf $t_{nk} = \frac{\pi \cdot D}{Z} = 24{,}5$ mm,

am Nutengrunde noch $t_{ng} = t_{nk} \cdot \frac{D_a - 2h_n}{D_a} = 19{,}9$ mm.

Wir wählen als scheinbare Zahninduktion am Zahnfuß 23000 Gauß, was bei den kurzen und stark konischen Zähnen noch gut zulässig ist. Dann ist die erforderliche Zahnstärke am Zahnfuß

$$b_{zg} = \frac{B_l \cdot t_{nk} \cdot L_i}{B_{zg} \cdot k_p \cdot L} = 24{,}5 \cdot \frac{8000}{23000} \cdot \frac{19{,}5}{0{,}9 \cdot 19{,}5} = 9{,}5 \text{ mm}.$$

Wir entscheiden uns für eine Nutenweite $b_n = 10{,}5$ mm. Dann bleibt am Zahnfuß nur eine Zahnstärke von 9,4 mm übrig; also wird $B_{zg} = 23200$.

Der erforderliche Abzug für die Nutenisolation (Glimmerumpressung der Stabbündel) beträgt bei Spannungen bis zu 500 Volt in der Höhe etwa 3,5 mm (dazu noch etwa 1,5 mm für die Bandagen mit ihrer Preßspanunterlage), in der Breite etwa 1,8 mm. Dazu kommt noch 0,4 mm Auftrag für die Papierbandumwicklung eines jeden Stabes. Für die $u = 3$ in der Nut nebeneinander liegenden Stäbe bleibt also in der Breite ein Raum von 10,5 — 1,8 = 8,7 mm, oder für jeden einzelnen Stab 2,9 mm einschließlich Papierbandumwicklung. In der Höhe bleibt für die umwickelten Stäbe ein Raum von je $\frac{1}{2}$ (30 — 3,5 — 1,5) = 12,5 mm. Wir wählen danach Stäbe von 12 × 2,5 mm = 30 mm² (mit Umwicklung 12,4 × 2,9 mm). Bild 33 zeigt den Nutenquerschnitt.

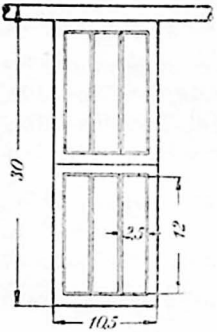

Bild 33. Nutenquerschnitt.

Der Strom im Stab ist $\frac{I_a}{2a} = 125$ Amp., die Stromdichte also 125 A : 30 mm² = 4,2 A/mm². Das dürfte bei dieser Maschine eben noch zulässig sein, was durch die folgende Erwärmungsberechnung bestätigt wird.

Im Ankerkern wählen wir die Induktion $B_a = 13000$ Gauß. Dann ist der erforderliche Eisenquerschnitt

$$Q_a = \tfrac{1}{2}\Phi : B_a = \tfrac{1}{2} \cdot 2{,}61 \cdot 10^6 \text{ Mw} : 13000 \text{ Gauß} = 100 \text{ cm}^2$$

und die erforderliche Ankereisenhöhe

$$h_a = Q_a : (k_p \cdot L) = 100 : (0{,}9 \cdot 19{,}5) = 5{,}7 \text{ cm}.$$

Wir wählen $h_a = 6$ cm ($B_a = 12400$), also Ankerinnendurch-

messer $D_i = D_a - 2h_n - 2h_a = 32 - 2 \cdot (3 + 6) = 14$ cm. Das genügt noch für Welle und Lüftungsöffnungen.

c) Verluste und Erwärmung

Um den Ohmschen Widerstand und damit den Stromwärmeverlust in der Ankerwicklung zu berechnen, muß die mittlere Windungslänge bekannt sein. Man entwirft deshalb zunächst die Wicklungszeichnung nach Bd. I, Bild 13 und entnimmt aus ihr die gesamte Stablänge $L_a + L_s$ (L_s = Länge einer Stirnverbindung) und die einseitige Ausladung der Wicklung A. Man kann diese Werte auch genügend genau berechnen nach den Formeln

$$L_s = \frac{(D - 2h_n) \cdot \pi}{2p \cdot \cos\alpha} + 2{,}5 \cdot h_n$$

$$A = \frac{(D - 2h_n) \cdot \pi}{4p \cdot \operatorname{cotg}\alpha} + 1{,}25 \cdot h_n,$$

wo $\sin\alpha = b_n : t_{ng}$.

Hier wird $\sin\alpha = 0{,}53$, $\cos\alpha = 0{,}85$, $\operatorname{tg}\alpha = 0{,}62$,

$$L_s = \frac{26 \cdot \pi}{4 \cdot 0{,}85} + 2{,}5 \cdot 3{,}0 = 24{,}0 + 7{,}5 = 31{,}5 \text{ cm}$$

und $A = \frac{26 \cdot \pi}{8} 0{,}62 + 1{,}25 \cdot 3{,}0 = 10$ cm.

Die ganze Stablänge wird $L_a + L_s = 21{,}5 + 31{,}5 = 53$ cm.

Das Gewicht des Ankerkupfers ist

$$G_k = 2 \cdot k \cdot w \cdot (L_a + L_s) \cdot q \cdot \gamma$$
$$= 2 \cdot 123 \cdot 1 \cdot 0{,}53 \text{ m} \cdot 30 \text{ mm}^2 \cdot 8{,}9 \cdot 10^{-3} \text{ kg/cm}^3 = 35 \text{ kg}.$$

Der Ohmsche Widerstand der Ankerwicklung ist

$$R_a = \varrho \cdot \frac{2 \cdot k \cdot w \cdot (L_a + L_s)}{(2a)^2 \cdot q} = \varrho \cdot \frac{2 \cdot 123 \cdot 1 \cdot 0{,}53 \text{ m}}{4 \cdot 30 \text{ mm}^2}.$$

Wir benötigen die Kenntnis des Widerstandes bei drei Temperaturen, nämlich 1. bei der mittleren Raumtemperatur von

20° C, weil ungefähr bei dieser Temperatur die erste Kontrolle des Widerstandes in der Werkstatt erfolgt, 2. bei der „Betriebstemperatur" von 75° C, weil für diese Temperatur der Wirkungsgrad angegeben wird, 3. bei der höchsten zulässigen Temperatur von 95° C, weil auch dabei die zulässige Erwärmung noch nicht überschritten werden darf. Bei

$$20^\circ\,\mathrm{C} \qquad 75^\circ\,\mathrm{C} \qquad 95^\circ\,\mathrm{C}$$

ist der spez. Widerst. $\varrho = 0{,}01754 \quad 0{,}0213 \quad 0{,}0226 \ \frac{\text{Ohm}}{\text{m/mm}^2}$

also der Ankerwid. $R_a = 0{,}0191 \quad 0{,}0232 \quad 0{,}0246$ Ohm. Die Ohmsche Spannung ist danach bei 75° C $I_a \cdot R_a = 5{,}8$ Volt. Der Stromwärmeverlust in der Ankerwicklung ist bei 75° C $I_a^2 \cdot R_a = 1450$ Watt, bei 95° C $I_a^2 \cdot R_a = 1540$ Watt.

Um den Eisenverlust zu ermitteln, berechnen wir zunächst das Gewicht des Ankereisens. Das Gewicht des Ankerkernes ist

$$G_a = (D - 2 \cdot h_n - h_a) \cdot \pi \cdot h_a \cdot k_p \cdot L \cdot \gamma$$
$$= 20 \cdot \pi \cdot 6 \cdot 0{,}9 \cdot 19{,}5 \cdot 7{,}8 \cdot 10^{-3} = 51{,}5 \text{ kg}$$

und das Gewicht der Ankerzähne

$$G_z = Z \cdot \tfrac{1}{2} \cdot (b_{zk} + b_{zg}) \cdot h_n \cdot k_p \cdot L \cdot \gamma$$
$$= 41 \cdot \tfrac{1}{2} \cdot (1{,}40 + 0{,}94) \cdot 3{,}0 \cdot 0{,}9 \cdot 19{,}5 \cdot 7{,}8 \cdot 10^{-3} = 19{,}7 \text{ kg}.$$

Die mittlere Induktion im Ankerkern wurde schon oben festgestellt: $B_a = 12400$ Gauß. Die Induktion in den Zähnen ist am Zahnfuß $B_{zg} = 23200$ Gauß, in der Zahnmitte

$$B_{zm} = B_{zg} \cdot \frac{b_{zg}}{b_{zm}} = 23200 \cdot \frac{19{,}9 - 10{,}5}{22{,}2 - 10{,}5} = 18600 \text{ Gauß}.$$

Verwenden wir für den Aufbau des Ankers normales Dynamoblech Sorte I mit der Verlustziffer $v_{10} = 3{,}6$ W/kg, und rechnen wir nach Seite 32 mit $v_h = \frac{2}{3} \cdot v_{10} = 2{,}4$ W/kg und $v_w = \frac{1}{3} \cdot v_{10} = 1{,}2$ W/kg, dann ist der Eisenverlust bei $f = 32{,}3$ nach Gl. 4 (S. 34)

$$v_e = \left[v_h \cdot \frac{f}{50} + v_w \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^2\right] \cdot \left[\left(\frac{B_a}{10000}\right)^2 \cdot G_a + \left(\frac{B_{zm}}{10000}\right)^2 \cdot G_z\right] =$$

$$= \left[2{,}4 \cdot \frac{32{,}3}{50} + 1{,}2 \cdot \left(\frac{32{,}3}{50}\right)^2\right] \cdot [1{,}24^2 \cdot 51{,}5 + 1{,}86^2 \cdot 19{,}7] =$$

$$= 300 \text{ Watt.}$$

Die auf S. 36 erörterten Abweichungen des wirklichen Eisenverlustes von der Rechnung berücksichtigen wir insgesamt durch einen Zuschlag von 100%. Wir rechnen also mit $V_e = 600$ Watt.

Den Zusatzverlust setzen wir nach REM § 62 mit 1% der aufgenommenen Leistung ein: $V_z = 560$ Watt.

Die gesamten zur Erwärmung des Ankers beitragenden Verluste sind:

$$V_k + V_e + V_z = 1540 + 600 + 560 = 2700 \text{ Watt.}$$

Als Wärmeabgabeziffer rechnen wir nach S. 58

$$h_a = 0{,}002 \cdot (1 + 0{,}7 \cdot \sqrt{v_a}) = 0{,}00765 \frac{\text{Watt}}{\text{cm}^2 \cdot {}^0\text{C}}.$$

Als wärmeabgebende Oberflächen rechnen wir:
die äußere Mantelfläche $\pi \cdot D_a \cdot (L_a + 2A)$
$= \pi \cdot 32 \cdot (21{,}5 + 2 \cdot 10) = 4150$ cm²,
die innere Mantelfläche $\pi \cdot D_i \cdot L_a = \pi \cdot 14 \cdot 21{,}5 = 950$ cm²,
und vier Stirnflächen je $\frac{\pi}{4}(D_a^2 - D_i^2) = 650$ cm²,
zusammen also $O_a = 4150 + 950 + 4 \cdot 650 = 7700$ cm².

Danach wird die Erwärmung der Ankeroberfläche

$$\vartheta_{\ddot{u}o} = (V_k + V_e + V_z) : (h_a \cdot O_a) = 2700 : (0{,}00765 \cdot 7700) =$$

$$= 46^0 \text{ C.}$$

Die mittlere Erwärmung der isolierten Ankerwicklung (durch Widerstandsmessung zu ermitteln) schätzen wir nach S. 55 um 25% höher, also $\vartheta_{\ddot{u}a} = 1{,}25 \cdot 46^0\text{ C} = 57{,}5\,^0\text{C}$.

Sie hält sich gerade innerhalb der zulässigen Grenze von 60° C. Es sei aber nochmals betont, daß die Genauigkeit dieser Rechnung nicht überschätzt werden darf.

3. Der Stromwender

Der Stromwenderdurchmesser war schon oben (S. 78) festgelegt worden: $\mathbf{D_k = 24\ cm}$. Damit kennen wir auch die Polteilung am Stromwender $t_{pk} = 18{,}8$ cm und die Stromwenderumfangsgeschwindigkeit $v_k = 12{,}2$ m/sec.

Aus den schon festliegenden Wicklungsdaten ergibt sich die Stegteilung $t_k = (\pi \cdot D_k) : k = 6{,}13$ mm. Bei Verwendung einer Glimmerisolation von 0,8 mm Stärke werden also Stege von 5,33 mm Breite benötigt. Beträgt die Steghöhe 40 mm, so wird die Stegbreite am unteren Rande 3,28 mm (Bild 34).

Für eine Gleichstrommaschine mittlerer Spannung und mäßiger Drehzahl wählt man elektrographitierte Kohlen, die mit etwa 10 A/cm² belastet werden können. Die notwendige Bürstenfläche ist also für jede Polarität 250: 10 = 25 cm² oder für jeden Bürstenbolzen 12,5 cm².

Eine normale Bürstenbreite für eine Maschine dieser Größe ist $b_k = 16$ mm $\left(\frac{1}{10} \ldots \frac{1}{15}\right.$ der Polteilung$\left.\right)$. Verwenden wir die genormten Kohlen 16 × 32 mm (5,1 cm²), so sind drei solcher Kohlen für jeden Bürstenstift erforderlich (15,3 cm²). Die gesamte Bürstenauflagefläche ist dann $F_b = 4 \cdot 15{,}3 = 61$ cm², die Stromdichte 250 : 30,6 = 8,2 A/cm².

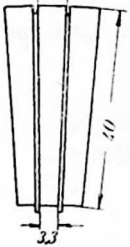

Bild 34. Stromwenderstege.

Um den Stromwender möglichst gleichmäßig abzunützen, werden die Bürsten der beiden gleichpoligen Reihen um 10 mm gegeneinander versetzt (gestaffelt), während die verschiedenpoligen an der gleichen Stelle des Stromwenders schleifen. Die Stromwenderschleiflänge wird deshalb $\mathbf{L_k = 125\ mm}$ (Bild 35).

Verluste am Stromwender: Übergangsverlust

$V_{\ddot{u}} = 2 \cdot I_a \cdot u_b = 2 \cdot 250 \cdot 1{,}25$ (nach Bild 19) = 625 Watt.

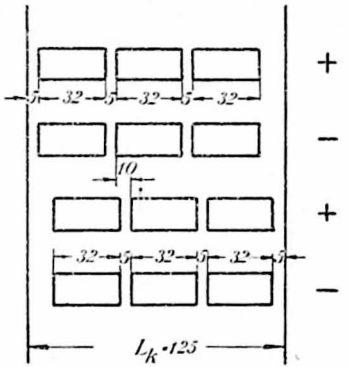

Bild 35. Staffelung der Bürsten.

Reibungsverlust $V_{rb} = 9{,}81 \cdot \mu \cdot p \cdot F_b \cdot v_k$

$$= 9{,}81 \cdot 0{,}22 \cdot 0{,}15 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \cdot 61 \text{ cm}^2 \cdot 12{,}2 \frac{\text{m}}{\text{sec}} = 240 \text{ W}.$$

Erwärmung des Stromwenders: Nach S. 58 rechnen wir als Wärmeabgabeziffer

$$h_k = 0{,}005 \cdot (1 + 0{,}7 \cdot \sqrt{v_k}) = 0{,}0172 \frac{\text{Watt}}{\text{cm}^2 \cdot {}^\circ\text{C}}$$

und als wärmeabgebende Oberfläche nur die Schleiffläche

$$\pi \cdot D_k \cdot L_k = \pi \cdot 24 \cdot 12{,}5 = 940 \text{ cm}^2.$$

Damit wird die Erwärmung

$$\vartheta_{\ddot{u}k} = \frac{V_{\ddot{u}} + V_{rb}}{h_k \cdot O_k} = \frac{625 + 240}{0{,}0172 \cdot 940} = 54^\circ \text{C}.$$

Der Stromwender erreicht also rechnungsmäßig nicht ganz die zulässige Erwärmung von 60° C; doch ist hier schon wegen der Unsicherheit der Übergangspannung ein gewisser Sicherheitsspielraum sehr erwünscht.

4. Die Welle

Durch das Normblatt DIN VDE 2100 ist der Wellenstumpf festgelegt. Er hat für eine Maschine von 50 kW bei ~ 1000 U/min einen Durchmesser von 70 mm und eine Länge von 170 mm. Im Lager der *A*-Seite und im Ankersitz muß der Wellendurchmesser etwas größer sein, wir rechnen hier mit 75 mm.

Eine Nachrechnung der so festgelegten Wellenmaße in bezug auf Festigkeit und Durchbiegung ist im allgemeinen kaum notwendig. Sie soll hier trotzdem durchgeführt werden.

Die Welle wird durch ein kombiniertes Moment (Drehmoment und Biegungsmoment) beansprucht. Als Drehmoment muß man das Doppelte des Nenndrehmomentes einsetzen, wegen der vorkommenden Überlastungen und Stöße. Das Nenndrehmoment ist $M_n = 973 \cdot N/n = 50$ mkg; wir rechnen also mit einem Höchstdrehmoment $M_d = 100$ mkg.

Bild 36. Belastung der Welle.

Um das Biegungsmoment berechnen zu können, muß man das Gewicht des Ankers G_a und des Stromwenders G_k, den magnetischen Zug P_m und, da der Motor auch mit Riementrieb arbeiten kann, den Riemenzug P_r kennen. Man muß weiter die Angriffspunkte dieser Kräfte und die Lagerstellen kennen. Wir beginnen zu diesem Zweck mit der Aufzeichnung der Maschine (Bild 38) und entnehmen aus ihr die in Bild 36 angegebene Lage der Belastungen und der Lagerdrücke P_1 und P_2.

Nun stellen wir zunächst die Gewichte zusammen:

Ankerkupfer (oben berechnet)	35 kg
Ankereisen (oben berechnet)	71 kg
Welle (berechnet nach Bild 38)	30 kg
Sonstige inaktive Teile des Ankers (geschätzt $^1/_3$ des Ankereisengewichtes)	24 kg
Zusammen Ankergewicht G_a =	160 kg

Stromwenderkupfer (angenähert berechnet als Hohlzylinder mit 240 mm Außendurchmesser, 160 mm Innendurchmesser und 125 mm Länge) . . . . . 28 kg
Inaktive Teile des Stromwenders (geschätzt $^1/_2$ des Stromwenderkupfergewichtes) . . . . . 14 kg
Zusammen Stromwendergewicht $G_k = 42$ kg

Der magnetische Zug ist abhängig von der Durchbiegung f, die wir mit $10\,\%$ des Luftspaltes δ annehmen (wird sie größer, so muß die Welle verstärkt werden). Man kann ihn dann berechnen nach der Formel

$$P_m = \frac{(\alpha_i \cdot B_l)^2}{8\pi} \cdot \pi \cdot D \cdot L_i \cdot \frac{f}{\delta} \cdot 10^{-6} = 220 \text{ kg}.$$

Die Abmessungen der Riemenscheibe sind genormt (DIN VDE 2100). Der Riemenscheibendurchmesser ist 450 mm. Die Umfangskraft an der Riemenscheibe ist beim Nenndrehmoment 50 mkg: 0,225 m = 222 kg. Den Riemenzug schätzen wir auf das Dreifache dieser Kraft, also 666 kg. Die Belastung der Welle wird am ungünstigsten, wenn der Riemenzug nach oben wirkt. Wir rechnen deshalb mit diesem Fall.

Dann ergibt sich nach bekannten Regeln der Mechanik der Lagerdruck $P_1 = -540$ kg (also nach unten wirkend), und $P_2 = 295$ kg. Das größte Biegungsmoment (im Ankersitz) wird $M_b = 115$ mkg und das kombinierte Moment

$$M_c = \sqrt{M_d^2 + M_b^2} = 152 \text{ mkg}.$$

Bei einem Wellendurchmesser $d = 7{,}5$ cm ist das Widerstandsmoment $W = \frac{\pi}{32} \cdot d^3 = 41{,}4$ cm³. Also wird die höchste Beanspruchung $\sigma b = M_c : W = 15200$ cmkg: 41,4 cm³ = 370 kg/cm². Zulässig sind 600 kg/cm².

Auch die Durchbiegung kann nun nach den aus der Festigkeitslehre bekannten Verfahren ermittelt werden, deren Einzelheiten nicht hierher gehören. Das Ergebnis ist eine Durchbiegung von 0,24 mm, also ein zulässiger Wert, da wir den Luftspalt sicher größer als 2,4 mm machen werden.

Eine Nachrechnung der kritischen Drehzahl ist erst bei wesentlich größeren oder wesentlich rascher laufenden Maschinen notwendig.

5. Die Hauptpole

a) Polkerne und Joch

Der Luftspalt δ unter den Hauptpolen soll so bemessen werden, daß die Verzerrung des magnetischen Feldes durch den Ankerstrom nicht allzu groß wird, d. h. etwa so, daß das magnetische Feld bei Nennlast noch an keiner Stelle unter dem Polbogen seine Richtung umkehrt. Auch wegen des Oberflächenverlustes in den Polschuhen (S. 36) darf der Luftspalt nicht allzu klein sein. Andererseits soll er natürlich auch nicht zu groß werden, weil das einen überflüssigen Mehraufwand an Erreger-Amperewindungen, also an Kupfer für die Erregerwicklung und an Verlusten in dieser Wicklung bedeuten würde. Ein praktisch brauchbarer Wert für den Luftspalt einer Maschine mit Wendepolen ist etwa 1,5% ... 2% der Polteilung. Wir wählen $\delta = 4$ mm. Bei einer Maschine ohne Wendepole müßte der Luftspalt wesentlich größer sein; bei einer Maschine mit Kompensationswicklung dürfte er noch etwas kleiner werden.

Der Querschnitt des Polkerns wird so bemessen, daß eine Induktion von etwa 16000 Gauß nicht überschritten wird. Dabei bedenken wir, daß der Fluß im Polkern durch die Streuung um etwa 20% vergrößert wird. Er beträgt also $\Phi + \Phi_\sigma = 1{,}2 \cdot \Phi = 3{,}13 \cdot 10^6$ Mw. Wir brauchen also einen Kernquerschnitt von $3{,}13 \cdot 10^6 : 16000 = 195$ cm², oder eine Polkernbreite von $195 : (0{,}95 \cdot 19{,}5) = 10{,}5$ cm. Wir wollen 11 cm ausführen und erhalten dann eine Polkerninduktion $B_k = 15300$ Gauß.

Danach kann man schon anfangen, den Blechschnitt des Poles aufzuzeichnen (Bild 37). Beim Entwurf der Polhörner geht man davon aus, daß der Polbogen $\alpha \cdot t_p$ praktisch genau genug gleich dem ideellen Polbogen $\alpha_i \cdot t_p$ ist, wenn man den Luftspalt auf $^2/_3$ des Polbogens konstant hält (hier 4 mm) und dann bis zur Polspitze auf den doppelten Wert

(hier 8 mm) zunehmen läßt. Den Querschnitt an der Polhornwurzel kann man so berechnen, daß die Induktion dort etwa 20000 Gauß nicht überschreitet: Fluß durch die Polmitte (9 cm breit, bis zur gestrichelten Linie in Bild 37), 9 cm · 19,5 cm · 8000 Gauß = $1{,}4 \cdot 10^6$ Mw. Fluß durch eine Polhornwurzel $\frac{1}{2} \cdot (3{,}13 \cdot 10^6 - 1{,}4 \cdot 10^6) = 0{,}86 \cdot 10^6$ Mw. Erforderlicher Querschnitt $0{,}86 \cdot 10^6$ Maxwell : 20000 Gauß = 43 cm². Höhe der Polhornwurzel 43 : (0,95 · 19,5) = 2,3 cm.

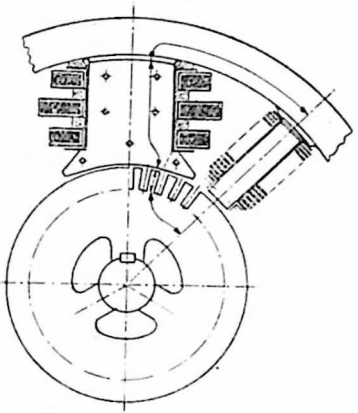

Bild 37. Blechschnitt und Polwicklungen.

Das Joch wollen wir aus Stahlguß herstellen; dann darf die Jochinduktion etwa 12000 Gauß betragen. Der erforderliche Querschnitt ist also $\frac{1}{2} \cdot 3{,}13 \cdot 10^6 : 12000 = 130$ cm². Das Joch wird etwa 50% breiter gemacht als die Pole (in der Richtung der Maschinenachse), also etwa 28 cm breit (Bild 38). Die radiale Höhe des Jochquerschnittes wird dann in der Mitte 5 cm.

Der Innendurchmesser des Joches kann so bemessen werden, daß er um 2 · 60% der Polteilung größer ist als der Ankerdurchmesser (bei mehrpoligen Maschinen auch um 2 · 70% der Polteilung).

Hier wird er $D_a + 2 \cdot 0{,}60 \cdot t_p = 32 + 2 \cdot 0{,}60 \cdot 25 = 62$ cm. Der Außendurchmesser des Joches wird 62 + 2·5 = 72 cm.

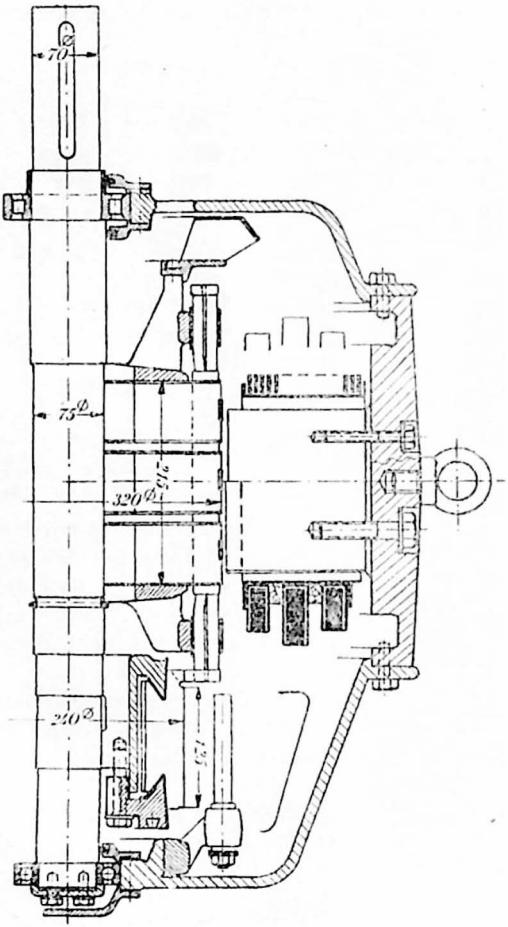

Bild 38. Schnittzeichnung.

b) Magnetische Nachrechnung

Die magnetische Spannung für den Luftspalt und die Ankerzähne berechnen wir nicht nur für die normale Luftinduktion $B_l = 8000$ Gauß, sondern auch für einige andere Induktionen, um auch die Feldverzerrung bei Belastung berücksichtigen zu können.

Für den Luftspalt benötigen wir den Carter'schen Faktor k_C nach Bd. I, S. 62. Aus Bild 39 (Bd. I) ergibt sich für $\delta : b_n = 4 : 10{,}5 = 0{,}38$ $y = 0{,}35$ und aus Gl. 19

$$k_C = \frac{t_n}{t_n - y \cdot b_n} = \frac{24{,}5}{24{,}5 - 0{,}35 \cdot 10{,}5} = 1{,}18.$$

Damit kann die magnetische Spannung für den Luftspalt nach Gl. 18b (Bd. I) berechnet werden: $V_l = 0{,}8 \cdot \delta \cdot k_C \cdot B_l = 0{,}8 \cdot 0{,}4 \text{ cm} \cdot 1{,}18 \cdot B_l = 0{,}377 \cdot B_l$ (siehe Tabelle).

Für die Zähne berechnen wir zunächst die scheinbare Zahninduktion nach Gl. 20 (Bd. I, S. 63)

$$B_{zs} = B_l \cdot \frac{t_{nk} \cdot L_i}{b_z \cdot k_p \cdot L} = B_l \cdot \frac{24{,}5 \cdot 19{,}5}{b_z \cdot 0{,}9 \cdot 19{,}5},$$

wobei wir für den Zahnkopf $b_{zk} = 14$ mm, für die Zahnmitte $b_{zm} = 11{,}7$ mm und für den Zahnfuß $b_{zg} = 9{,}4$ mm einzusetzen haben. Dann berechnen wir die Querschnitte der Nebenwege:

	Für Zahnkopf	Zahnmitte	Zahnfuß
ist die Nutenteilung t_n	= 24,5	22,2	19,9 mm
$Q_n + Q_z = t_n \cdot (L + L_v)$	= 52,7	47,7	42,8 cm²
$Q_z = b_z \cdot k_p \cdot L$	= 24,6	20,5	16,5 cm²
Q_n	= 28,1	27,2	26,3 cm²
$Q_n : Q_z$	= 1,15	1,33	1,60

Damit entnehmen wir nach dem in Bild 41 (Bd. I) dargestellten Verfahren aus Bild 34 (Bd. I) gleichzeitig die magnetische Feldstärke im Zahn H_{zk}, H_{zm}, H_{zg} und die wirkliche Zahninduktion B_z (siehe Tabelle). Nun kann die mittlere magnetische Feldstärke H_z und aus ihr die magnetische Spannung für den Zahn V_z nach Gl. 22 (Bd. I) berechnet und danach die Übertrittskennlinie $B_l = f(V_l + V_z)$ aufgezeichnet werden.

Luftinduktion	$B_l =$	7000	8000	9000	10000	Gauß
Magn. Spg. f. d. Luft	$V_l =$	2640	3015	3395	3770	Amp.
Scheinbare Zahninduktion B_{zs}	Kopf	13600	15500	17500	19500	Gauß
	Mitte	16300	18600	20900	23250	„
	Fuß	20300	23200	26100	29000	„
Wirkliche Zahninduktion B_z	Kopf	13600	15500	17300	19100	„
	Mitte	16200	18300	20200	21600	„
	Fuß	19700	21500	22500	23700	„
Magn. Feldstärke im Zahn	Kopf	10	30	90	220	A/cm
	Mitte	50	150	380	920	„
	Fuß	290	840	1720	2650	„
Mittlere Feldstärke	$H_z =$	83	245	555	1090	„
Mag. Spg. f. d. Zahn	$V_z =$	250	735	1665	3270	Amp.
Magn. Spannung für Luft und Zähne	$V_l + V_z =$	2890	3750	5060	7040	„

Tragen wir in die Übertrittskennlinie nach Bd. I, Bild 47, für die Polmitte die Induktion $B_0 = 8000$ ein, also $V_0 = 3750$, und für die Polspitzen magnetische Spannungen, die um $\frac{1}{2} \cdot \alpha_i \cdot l_p \, A = \frac{1}{2} \cdot \frac{2}{3} \cdot 25{,}1 \cdot 306 = 2550$ Amp. höher bzw. niedriger liegen, so finden wir durch Ausmessen der Fläche unter der B_l-Kurve eine mittlere Induktion von 7500 Gauß, die bei Leerlauf mit 3250 Amp. für Luft und Zähne erregt werden kann. Die feldschwächende Wirkung des Querfeldes beträgt also bei Nennlast $\theta_q = 3750 - 3250 = 500$ Amp.

Die weitere Rechnung führen wir nur noch für drei Werte der Luftinduktion durch. Für den Anker, den Polkern und das Joch entnehmen wir aus Bild 37 die mittleren Kraftlinienlängen $l_a = 8$ cm, $l_k = 14$ cm, $l_j = 24{,}5$ cm. Für das Joch (Stahlguß) können wir dieselbe Magnetisierungskurve zugrunde legen wie für Dynamoblech Sorte I (Bd. I, Bild 34).

Wir erhalten für die Luftinduktion		$B_l =$	7000	8000	9000	Gauß
die magn. Induktionen	im Anker	$B_a =$	10800	12400	13900	„
	im Polkern	$B_k =$	13400	15300	17200	„
	im Joch	$B_j =$	10500	12000	13500	„

die magnetische Feldstärke	im Anker	$H_a =$	3	6	13	A/cm
	im Polkern	$H_k =$	10	28	90	,,
	im Joch	$H_j =$	2,5	5	11	,,
die magnetische Spannung	im Anker	$V_a =$	20	40	90	Amp.
	im Polkern	$V_k =$	140	390	1260	,,
	im Joch	$V_j =$	60	120	270	,,
zusammen		$V_a + V_k + V_j =$	220	550	1620	,,
dazu für Luft u. Zähne		$V_l + V_z =$	2890	3705	5060	,,
Durchflutung der Erregerwicklung bei Leerlauf		$\Theta_{eo} = V_l + V_z + V_a + V_k + V_j =$	3110	4300	6680	,,

Die erforderliche Durchflutung der Erregerwicklung bei Nennlast ist $\Theta_e = \Theta_{eo} + \Theta_q = 4300 + 500 = 4800$ Amp.

Mit Rücksicht auf die Stabilität (vgl. S. 24) muß der Motor eine Hilfsverbundwicklung erhalten. In diese Wicklung legen wir etwa 10% der Durchflutung Θ_e. Wir geben ihr also 2 Windungen je Pol; ihre Durchflutung ist dann $2 \cdot I_a = 500$ A. Für die Nebenschlußwicklung bleibt noch eine Durchflutung von 4300 A.

c) Hauptpolwicklung

Aus der erforderlichen Durchflutung $\Theta_e = 4800$ Amp. kann der Wicklungsraum zunächst mittels einer geschätzten Stromdichte und eines geschätzten Füllfaktors bestimmt werden. Wir schätzen die zulässige Stromdichte $s_e = 2{,}5$ A/mm² und den Füllfaktor des Spulenquerschnittes 50% und erhalten einen erforderlichen Gesamt-Spulenquerschnitt von $4800 : (0{,}5 \cdot 2{,}5) = 3840$ mm², davon 3450 cm² für die Nebenschlußwicklung. Dieser Querschnitt kann, wie Bild 37 zeigt, in dem verfügbaren Raum gut untergebracht werden. Wir wollen je Pol 3 Spulen anordnen, die zwischen Preßspanplatten gefaßt und mit Lackband umwickelt und durch Lüftungsschlitze von je 12 mm voneinander getrennt werden. Diese Spulen werden danach je 24 mm breit. Die Wickelhöhe kann für die Nebenschlußspulen 5 cm betragen, so daß ein Querschnitt von $3 \cdot 5 \cdot 2{,}4 = 36$ cm² entsteht.

Die mittlere Windungslänge der Nebenschlußwicklung kann aus Bild 37 entnommen werden; sie beträgt, da der Polkern einen Querschnitt von 19,5 · 11 cm hat, und da der Schwerpunkt des Wicklungsquerschnittes 2,7 cm vom Eisen entfernt ist, $L_{me} = 2 \cdot (19{,}5 + 11) + 2\pi \cdot 2{,}7 = 78$ cm.

Der erforderliche Drahtquerschnitt ergibt sich aus Gl. 29 (Bd. I): $q_e = 2p \cdot \theta_e \cdot \varrho \cdot L_{me} : U$

$= 4 \cdot 4300 \cdot 0{,}0213 \cdot 0{,}78 : 220 = 1{,}30$ mm².

Als spezifischer Widerstand ist für Kupfer $\varrho = 0{,}0213$ $\frac{\text{Ohm}}{\text{m/mm}^2}$ eingesetzt, damit die Wicklung im betriebswarmen Zustand die richtige Durchflutung aufweist. Wir wählen eine Drahtstärke $d = 1{,}30$ mm ($q_e = 1{,}327$ mm²). Mit doppelter Baumwollbespinnung (Auftrag mit Tränkung 0,25 mm) wird der Durchmesser des isolierten Drahtes $d + i = 1{,}55$ mm. In dem vorgesehenen Wicklungsraum haben Platz: in jeder Spule 32 Lagen und in jeder Lage 15 Drähte, also insgesamt $w_e = 3 \cdot 15 \cdot 32 = 1440$ Windungen.

Das Kupfergewicht der Nebenschlußwicklung ist $G_{Le} = 2p \cdot w_e \cdot L_{me} \cdot q_e \cdot \gamma = 4 \cdot 1440 \cdot 0{,}78 \cdot 1{,}327 \cdot 8{,}9 \cdot 10^{-3} = 53$ kg. Der Widerstand der Nebenschlußwicklung ist

$$R_e = \varrho \cdot 2p \cdot w_e \cdot L_{me} : q_e = \varrho \cdot 4 \cdot 1440 \cdot 0{,}78 : 1{,}327,$$

also bei 20° C ($\varrho = 0{,}01754$) $R_e = 59$ Ohm und bei 75° C ($\varrho = 0{,}0213$) $R_e = 72$ Ohm.

Bei betriebswarmer Wicklung wird also der Erregerstrom $i_e = U : R_e = 220 : 72 = 3{,}05$ Amp., die Durchflutung der Erregerwicklung $\theta_e = i_e \cdot w_e = 4400$ Amp. und die Stromdichte $s_e = i_e : q_e = 3{,}05 : 1{,}327 = 2{,}3$ A/mm². Der Erregerverlust beträgt bei der Betriebstemperatur $V_{err} = U \cdot i_e = 220 \cdot 3{,}05 = 670$ Watt.

Die Hilfsverbundwicklung erhält einen Querschnitt von 100 mm² (Strom $I_a = 250$ A, Stromdichte 2,5 A/mm²) und wird aus flachgepreßter Litze mit 10 × 12,5 mm (80% Raum-

ausnützungsfaktor) hergestellt. Die zwei Windungen haben auf der mittleren Spule der Nebenschlußwicklung Platz und vergrößern (mit Isolierung) die Höhe dieser Spule von 50 auf 64 mm (Bild 37).

Die mittlere Windungslänge der Hilfsverbundwicklung ist 98 cm; ihr Kupfergewicht also $G_{kr} = 7$ kg und ihr Ohmscher Widerstand $R_r = 0{,}0014$ Ohm bei 20° C bzw. $R_r = 0{,}0017$ Ohm bei 75° C. Der Stromwärmeverlust in der Hilfsverbundwicklung ist also bei der Betriebstemperatur

$$I^2 \cdot R_r = 250^2 \cdot 0{,}0017 = 105 \text{ W}.$$

Auch für die Erwärmungsrechnung genügt hier die Kenntnis des Verlustes bei der normalen Betriebstemperatur, da bei der höchstzulässigen Temperatur (95° C) der Verlust nicht größer, sondern kleiner wird.

Nach S. 58 rechnen wir mit der Wärmeabgabeziffer

$$h_e = 0{,}0005 \cdot (1 + 0{,}7 \cdot \sqrt{v_a}) = 0{,}00191 \text{ W/cm}^2 \cdot {}^\circ\text{C}.$$

Die von Luft bestrichenen Oberflächen sind:
äußere Mantelflächen der Spulen

$$2 \cdot 2{,}4 \text{ cm} \cdot 94 \text{ cm} + 1 \cdot 2{,}4 \text{ cm} \cdot 103 \text{ cm} = 700 \text{ cm}^2,$$

Stirnflächen (von denen die inneren 1,5 cm als durch Stützkonstruktionen abgedeckt gerechnet werden)

$$4 \cdot 3{,}5 \text{ cm} \cdot 83 \text{ cm} + 2 \cdot 5 \text{ cm} \cdot 89 \text{ cm} = 2050 \text{ cm}^2,$$

zusammen also 2750 cm² je Pol. Die strahlende Oberfläche ist $2 \cdot 3{,}5 \text{ cm} \cdot 83 \text{ cm} + 10 \text{ cm} \cdot 100 \text{ cm} = 1580$ cm² je Pol.

Wir rechnen nach S. 58 mit dem arithmetischen Mittel aus der von Luft bespülten und der strahlenden Oberfläche, also mit $O_e = 2p \cdot \frac{1}{2} \cdot (2750 + 1580) = 8600$ cm².

Damit wird die mittlere Oberflächenerwärmung der Erregerwicklung $\vartheta_{\ddot{u}o} = (670 + 105) : (0{,}00191 \cdot 8600) = 47°$ C. Die mittlere Erwärmung der Wicklung, wie sie durch Widerstandsmessung gefunden wird, schätzen wir nach S. 58 um 25% höher als die Oberflächenerwärmung, also $\vartheta_{\ddot{u}e} = 1{,}25 \cdot 47°\text{ C} = 59°$ C. Sie bleibt also gerade noch innerhalb der zulässigen Grenzen,

6. Die Wendepole

Nach Bd. I, Gl. 31a, S. 78, ist die Breite der Wendezone

$$b_{wz} = b'_k + t_n + \left(|\varepsilon_k| - \frac{a}{p}\right) \cdot t'_k$$

$$= 16 \cdot \frac{32}{24} + 24{,}5 + \left(0{,}25 - \frac{1}{2}\right) \cdot \frac{24{,}5}{3} = 43{,}8 \text{ mm}.$$

Dabei ist eingesetzt: $\varepsilon_k = \frac{k}{2p} - y_1 = 30{,}75 - 31 = -0{,}25$

und $t'_k = t_k \cdot \frac{D_a}{D_k} = \frac{t_n}{u} = \frac{24{,}5}{3}$ mm.

Die Breite der Wendepole braucht nicht genau dieser Wendezonenbreite zu entsprechen. Es genügt, wenn sie etwa $^2/_3$ davon beträgt; sie muß aber auch dann ausreichen, wenn dieselbe Maschinentype für andere Spannungen oder Drehzahlen gebaut, also mit anderer Wicklung versehen wird. Die größte Wendezonenbreite entsteht bei der kleinsten Nutenzahl ($Z = 40$, $t_n = 25$ mm), bei der größten Schrittverkürzung ($\varepsilon_k \approx 1{,}5$) und bei Wellenwicklung, und beträgt $b_{wz\,\max}$ $= 55$ mm. Wir wählen die Wendepolbreite $\mathbf{b_W = 36\ mm}$. Der Wendepolluftspalt δ_w soll etwa 2,5% der Polteilung betragen (Bd. I, S. 82). Wir wählen $\delta_w = 6$ mm.

Da der Wendepolfluß sich im Luftspalt etwas ausbreitet, können wir die ideelle Breite der Wendepole b_{wi} etwas höher einschätzen als die wirkliche Breite, etwa $b_{wi} = b_w + 2 \cdot \delta_w =$ 48 mm. Sie reicht im vorliegenden Fall aus, um die ganze Wendezone zu beherrschen.

Die für geradlinige Stromwendung erforderliche Wendefeld-Induktion ist $B_{weg} = \zeta \cdot A$ (Bd. I, Gl. 33). Dabei kann man die Pichelmayer'sche Kommutierungskonstante ζ praktisch genau genug folgender Formel entnehmen:

$$\zeta = 0{,}6 \cdot \frac{h_n}{b_n} + \frac{L_s}{L_i},$$

hier ist also $\zeta = 3{,}3$. Danach wird $B_{weg} = \zeta \cdot A = 1000$ Gauß.

Mit Rücksicht auf die erwünschte Überkommutierung (Bd. I, S. 87) vergrößern wir die Wendefeldinduktion noch um einen solchen Betrag, daß die zwischen den Bürstenkanten induzierte Restspannung $\Sigma(e_w - e_r)$ nach Bd. I, Gl. 38, S. 88 etwa die Bürstenübergangsspannung an der auflaufenden Kante erreicht (nach Bild 19 bei ~ 10 A/cm² etwa 1,3 Volt). Zwischen den Bürstenkanten liegen $\frac{b_k}{t_k} \cdot \frac{p}{a} = \frac{16}{6{,}13} \cdot \frac{2}{1} = 5{,}2$ Teilspulen; es ist also in jeder Teilspule eine zusätzliche Spannung $(e_w - e_r) = 1{,}3 : 5{,}2 = 0{,}25$ Volt zu induzieren. Dazu benötigt man eine zusätzliche Wendefeldinduktion

$$B_{wz} = (e_w - e_r) : (2 \cdot L_i \cdot v_a \cdot w \cdot 10^{-6}) = 400 \text{ Gauß}.$$

Insgesamt wird also die erforderliche Wendefeldinduktion

$$B_w = B_{weg} + B_{wz} = 1000 + 400 = 1400 \text{ Gauß}.$$

Um Wendepolkupfer zu sparen, verkürzen wir die Wendepole auf $L_{pw} = 15$ cm. Dann wirkt auf den Rest der ideellen Ankerlänge (4,5 cm) das Ankerquerfeld B_q (Bd. I, Bild 46). Wir schätzen $B_q = 4 \cdot A = 1200$ Gauß. Der Fehler der Induktion beträgt also hier $1400 + 1200 = 2600$ Gauß. Er muß ausgeglichen werden durch eine Erhöhung der Induktion im Gebiet der verbleibenden Wendepollänge (15 cm). Diese Erhöhung muß betragen: $\frac{4{,}5}{15} \cdot 2600 = 800$ Gauß. Wir wollen deshalb eine Wendefeldinduktion von 2200 Gauß anstreben.

Die magnetische Spannung für den Wendepolluftspalt wird nach Bd. I, Gl. 35

$$V_{lw} = 0{,}8 \cdot \delta_w \cdot k_{Cw} \cdot B_w = 0{,}8 \cdot 0{,}6 \cdot 1{,}11 \cdot 2200 = 1170 \text{ Amp.}$$

(Für $\delta = 6$ mm und $b_n = 10{,}5$ mm wird nach Bd. I, Bild 39 und Gl. 19 $k_C = 1{,}11$). Für den Wendepolkern und die übrigen Teile des Wendepolkreises setzen wir einen geschätzten Zuschlag von 20% ein. Wir rechnen also mit insgesamt

$V_{ww} = 1{,}20 \cdot 1170 = 1400$ Amp. als erforderliche Erregung des Wendepolkreises.

Die mittlere Ankerfelderregung im Bereich der Wendezone ist nach Gl. 37 (Bd. I)

$$\theta_a = \tfrac{1}{2}\, t_p \cdot A - \tfrac{1}{3}\, b_{wz} \cdot A = 3850 - 450 = 3400 \text{ Amp.}$$

Also ist die erforderliche Durchflutung der Wendepolwicklung $\theta_{ww} = \theta_a + V_{ww} = 3400 + 1400 = 4800$ Amp. und die erforderliche Windungszahl der Wendepolwicklung

$$w_{ww} = \theta_w : I_a = 4800 : 250 = 19{,}2.$$

Wir entscheiden uns für $w_{ww} = 19$.

Die Wicklung wird bei der geringen Windungszahl als Blankpolwicklung ausgeführt (Bd. I, Bild 5). Als Isolierung gegen das Wendepoleisen und zwischen den Windungen verwenden wir Mikanit (Isolierung Klasse B, zulässige Erwärmung 90° C). Für eine solche Wicklung ist eine Stromdichte von etwa 3 A/mm² zulässig. Der erforderliche Leiterquerschnitt ist also 250 : 3 ≈ 80 mm². Nach der Zeichnung (Bild 37) haben wir 11 cm Wicklungshöhe zur Verfügung. Für jede Windung bleibt also eine Höhe von 5,8 mm, davon 4 mm Kupfer und 1,8 mm Isolationszwischenraum. Der Kupferquerschnitt wird also 20 · 4 mm.

Der Polquerschnitt ist 15 · 3,6 cm. Der Schwerpunkt des Wicklungsquerschnittes liegt 12,5 mm vom Eisen ab, da wir zwischen Pol und Wicklung einen nur teilweise mit Isolation ausgefüllten Spielraum von 2,5 mm einseitig lassen wollen. Die mittlere Windungslänge ist also

$$L_{mw} = 2 \cdot (15 + 3{,}6) + 2\pi \cdot 1{,}25 = 37{,}2 + 7{,}8 = 45 \text{ cm}$$

und der äußere Umfang $2 \cdot (15 + 3{,}6) + 2\pi \cdot 2{,}25 = 51$ cm.

Die gesamte Länge der Wendepolwicklung wird danach $2p \cdot w_w \cdot L_{mw} = 4 \cdot 19 \cdot 0{,}45 = 34{,}2$ m, mit Verbindungen 36 m. Kupfergewicht der Wendepolwicklung:

$$G_{kw} = 36 \text{ m} \cdot 80 \text{ mm}^2 \cdot 8{,}9 \cdot 10^{-3} \text{ kg/cm}^3 = 26 \text{ kg}.$$

Der Widerstand der Wendepolwicklung wird bei 20° C

$$R_w = 0{,}01754 \cdot \frac{36}{80} = 0{,}0079 \text{ Ohm},$$

bei 75° C $\quad R_w = 0{,}0079 \cdot \dfrac{235 + 75}{235 + 20} = 0{,}0096$ Ohm,

bei der höchsten zulässigen Temperatur (hier 125° C)

$$R_w = 0{,}0079 \cdot \frac{235 + 125}{235 + 20} = 0{,}0111 \text{ Ohm}.$$

Die Verluste sind bei 75° C $I_a^2 \cdot R_w = 600$ Watt, bei 125° C 700 Watt.

Erwärmung der Wendepolwicklung. Als Wärmeabgabeziffer rechnen wir ebenso wie für Hauptpolwicklung

$$h_w = 0{,}0005 \cdot (1 + 0{,}7 \cdot \sqrt{v_a}) = 0{,}00191 \frac{\text{Watt}}{\text{cm}^2 \cdot {}^0\text{C}}.$$

Die von Luft bespülte Oberfläche der Wendepolwicklung setzt sich zusammen aus der äußeren Mantelfläche (Umfang 51 cm), also $51 \cdot 11 = 560$ cm² je Pol, und aus den Flächen, die durch die freien Abstände zwischen den einzelnen Windungen gebildet werden. Dabei wollen wir annehmen, daß zwischen den Windungen Distanzstücke von 10 mm Breite liegen, so daß noch 10 mm von jeder Windung gekühlt werden. Wegen der Enge dieser Schlitze wollen wir die an ihnen einander gegenüberliegenden Flächen nur zu 80% als wirksam rechnen. Dann erhalten wir je Pol noch $0{,}8 \cdot 2 \cdot 19 \cdot 1$ cm $\cdot$ 48 cm $=$ 1460 cm², also insgesamt eine von Luft bespülte Oberfläche von 2020 cm² je Pol. Als strahlende Oberflächen kommt nur die äußere Mantelfläche mit 560 cm² in Betracht. Wir rechnen wieder mit dem arithmetischen Mittel dieser Flächen, also $O_w = 2p \cdot \frac{1}{2} \cdot (2020 + 560) = 5160$ cm².

Die Erwärmung der Wendepolwicklung ist nun

$$\vartheta_{\ddot{u}w} = V_{kw} : (h \cdot O_w) = 700 : (0{,}00191 \cdot 5160) = 71^0 \text{ C}.$$

Auch diese Erwärmung liegt noch innerhalb der zulässigen Grenze von 90° C.

7. Wirkungsgrad

Die Verluste sind fast alle beim Entwurf der Einzelteile der Maschine schon berechnet worden. Wir stellen sie hier nochmals zusammen:

Stromwärmeverlust im Anker bei 75° C	$V_{ka} = 1450$ Watt
Zusatzverlust nach REM § 62 (1%)	$V_z = 560$ „
Bürstenübergangsverlust (für die Wirkungsgradbestimmung nach dem Einzelverlustverfahren gemäß REM § 60 d, mit 1 Volt Spannungsabfall gerechnet)	$V_{ü} = 500$ Watt
Stromwärmeverlust in der Wendepolwicklung bei 75° C	$V_{kw} = 600$ „
Stromwärmeverlust in der Hilfsverbundwicklung bei 75° C	$V_{kc} = 105$ „
Erregungsverlust	$V_{err} = 670$ „
Eisenverlust	$V_e = 600$ „
Bürstenreibungsverlust	$V_{rb} = 250$ „
Lagerreibungsverlust (geschätzt nach Gl. 6b) ..	$V_{rl} = 50$ „
Luftreibungsverlust (Ventilationsverlust) geschätzt	$V_v = 500$ „
Summe der Verluste	5285 Watt

$$\text{Wirkungsgrad: } = 1 - \frac{5{,}285}{50 + 5{,}285} = 1 - 9{,}5\% = 90{,}5\%.$$

Der Wirkungsgrad ist also um 1,5% höher als nach dem Normblatt verlangt wird. Das liegt hauptsächlich daran, daß der Berechnung eine Maschine mit Wälzlagern zugrunde gelegt wurde. Bei Verwendung von Gleitlagern würde der Wirkungsgrad um etwa 1% niedriger liegen.

Im übrigen ist es natürlich erwünscht, wenn zwischen der Rechnung und dem nach den Normen einzuhaltenden Wert noch ein kleiner Spielraum bleibt.

Sachregister für Band I und II

Amplidyne II, 19
Ankerkörper I 16
Ankerrückwirkung I 69
Ankerwicklung I 18, 34
Anlaßwiderstand II 20, 28
Ausgleichsverbindungen I 48
Ausnützungszahl II 66
Aussetzender Betrieb II 61

Beanspruchungen, elektromagnetische II 69
Berechnungsbeispiel II 76
Bremsung II 30
Bürsten I 26
Bürstenhalter I 27
Bürstenreibung II 39
Bürstenspannungs-Kurve I 88
Bürstenspitzenspannung I 90
Bürstenübergangsverlust II 37, 49

Carter'scher Faktor I 62

Doppelschlußerregung II 5, 26
Drehmoment II 21
Drehschub, mittl. II 67
Drehzahlregelung II 26
Drehzahlverhalten II 21

Ebenmaß II 72
Einzelverlustverfahren II 46
Eisenverluste II 33
Entwurf der Ankerwicklung I 55
Entwurfsgleichung II 64
Erregerstrom-Kennlinien II 6
Erregerwicklung I 73
Erregungsverlust II 37, 47
Erwärmung II 50
Erwärmungsformeln II 55
Felderregerkurve I 67
Fremderregung II 5
Funkenspannung I 89
Gegenerregung II 6
Geschlossene Maschinen II 58
Größenbemessung II 63
Hauptabmessungen II 64
Hauptpole I 14
Hauptpolwicklung I 14
Hysteresisverlust II 34
Induzierte Spannung I 44
Innere Leistung II 64
Isolierung I 22

Kennlinien von Motoren II 21
Kennlinien von Stromerzeugern II 6
Klemmenbezeichnung II 5
Kohlenbürsten I 26
Kompensationswicklung I 71
Kritische Drehzahl II 10
Kritischer Widerstand II 9
Kurzschlußdauer I 75
Kurzzeitiger Betrieb II 61

Lager I 30
Laststrom-Kennlinien II 6
Lastverluste II 42
Leerlaufkennlinie I 65
Leerverluste II 41, 47
Leonardschaltung II 30
Lichtbogenschweißung II 11
Luftspaltfeld I 59
Lüftung I 33

Magnetischer Kreis I 54
Metadyne II 16

Nebenschlußerregung II 5, 20
Nebenschlußmotor II 22, 31
Nennlast II 7
Nutenanker I 35
Nutendämpfer I 98

Pichelmayer'sche Kommutierungskonstante I 80
Polzahl II 73
Pulsation des Hauptpolflusses I 94

Querfeld-Maschinen II 14

Reaktanzspannung I 79
Reibungsverluste II 39
Reihenschlußerregung II 5, 20
Reihenschlußmotor II 22, 25, 32
Rückarbeitsverfahren II 44

Schablonenwicklung I 18
Schaltung von Motoren II 20
Schaltung von Stromerzeugern II 5
Schleifenwicklung I 38
Schutzarten I 31
Schweißstromerzeuger II 11
Selbsterregung II 7
Spannungsabfalldreieck II 6
Spannungsänderung II 7
Spulenwicklung I 18
Stabwicklung I 18
Stegspannung I 46
Stoßkennlinie II 14
Stoßkurzschlußstrom II 14
Streuung I 64
Strombelag I 54
Stromdichte I 53
Stromwärmeverluste II 37, 47
Stromwender I 23
Stromwendespannung I 78
Stromwendung I 74
Symmetrie der Wicklung I 93

Temperaturmessung II 51
Treppenwicklung I 43
Trommelwicklung I 34
Typenreihe II 74

Überkommutierung I 87
Übertrittskennlinie I 68
Umpolung II 10
Unregelmäßige Wellenwicklung I 42
Unterkommutierung I 87

Verbundwicklung II 8
Verluste II 33

Wärmeabgabezahl II 55
Wellenwicklung I 39
Wendepole I 16, 80
Wendepolerregung I 82
Wendepolwicklung I 16
Wendezone I 77
Wicklungselement I 35
Wicklungsregeln I 38
Widerstandsgerade II 8
Widerstands-Kommutierung I 85
Wirbelstromverlust II 34
Wirkungsgrad II 42

Zeitkonstante der Erwärmung II 60
Zusatzverluste II 39, 49

FRITZ RASKOP

Berechnungsbuch des Elektromaschinenbauer-Handwerkers (Ankerwicklers)

Anleitung und Tabellen für die Berechnung der Wickeldaten bei Instandsetzungen, Neu- und Umwicklungen von elektrischen Maschinen und Apparaten

7., vermehrte und verbesserte Auflage. Oktav. Mit 45 Textabbildungen und 56 Tabellen. XI, 209 Seiten. 1953. Ganzleinen DM 12.—

Der Katechismus für die Ankerwickelei

Leitfaden für die Herstellung der Wicklungen an elektrischen Maschinen, Transformatoren und Starkstromapparaten

11., vermehrte u. verbesserte Auflage. 35.—38. Tausend. Oktav. Mit 356 Abbildungen und Wicklungsschaltbildern. XVI, 441 Seiten. 1953. Ganzleinen DM 20.—

Das Elektromaschinenbauer-Handwerk

Instandsetzung, Neuwicklung und Umbau elektrischer Maschinen, Transformatoren und Apparate

3. Auflage. Oktav. 384 Seiten. 1949. Ganzleinen DM 18.—

„Ungeachtet der schlichten und leichtfaßlichen Darstellung . . . wird überall tief ins technische Detail eingegangen, und so wird nicht bloß Wissen, sondern mehr noch wirkliches Können einprägsam vermittelt. Es ist ein ausgezeichnetes Handbuch für den praktischen Maschinenelektriker, das jeder Berufsangehörige lesen sollte". Österr. Maschinenmarkt

E M A

Die elektrische Maschine. Fachliche Mitteilungen für Elektromaschinen-, Transformatoren- und Starkstrom-Apparatebau Herausgegeben von F. Raskop.

Oktav. Erscheinungsweise: monatlich 1 Heft mit 32 Textseiten. — Bezugspreis: ab Heft 1/1950 DM 2,40 je Heft, vierteljährlich DM 7,20 zuzüglich Postzustellgebühr. — Jahrgang 1948: Heft 1—6 je Doppelheft DM 4,—, Heft 7—12 je Doppelheft DM 3,—. — Jahrgang 1949: Heft 1—12 je Doppelheft DM 3,—, ab Heft 1/1956 DM 3,— je Heft

TECHNISCHER VERLAG HERBERT CRAM, BERLIN W 35

H. BORNEMANN

Bau und Berechnung von Leitungen und Leitungsnetzen

Teil I: Bau und Berechnung von Gleichstromleitungen.

Mit 72 Textabbildungen. Oktav. VII, 130 Seiten. 1956. DM 14,—

Teil II: Berechnung von Wechselstromleitungen.

Mit 64 Textabbildungen. VII, 141 Seiten. 1956. DM 16,—

B. HENKEN

Die Einführung des Zeitlohnes

in den Instandsetzungswerken elektrischer Maschinen und anderen Kleinbetrieben

Oktav. 53 Seiten mit 13 Formularen und 6 Textabbildungen. 1956. DM 5,80

TH. KONIGSHOFER

Die Lichtbogen-Schweißmaschinen

Kurze Einführung in die Wirkungsweise verschiedenartiger Schweißmaschinen und deren Verhalten im Betrieb.

Oktav. 54 Seiten mit 28 Textabbildungen. 1955. DM 5,20

Die Wicklungen elektrischer Maschinen

Allgemeinverständliche Einführung in die Wicklungen und deren Wirken in elektrischen Maschinen.

Oktav. 128 Seiten mit 139 Textabbildungen. 1956. DM 12,80

TECHNISCHER VERLAG HERBERT CRAM, BERLIN W 35

Neuauflage!

A. DÄSCHLER

Elektrotechnik

Ein Lehrbuch für den Praktiker

2., verbesserte Auflage. Oktav. VIII, 214 Seiten mit 266 Abbildungen. 1956. DM 8,60

„...Nach fachmännischem Ermessen unmißverständlich gehalten, ist dieses Werk ein ausgesprochenes Lehrbuch und eine wertvolle Hilfe sowohl für den Lehrenden und Lernenden der gewerblichen Berufsschulen, als auch für den jungen Menschen in der praktischen Ausbildung und den fertigen Praktiker." Elektro-Zentralblatt

H. GERSTENBERG

Einführung in die Elektrotechnik

Oktav. Mit 326 Abbildungen und 121 Beispielen. XII, 367 Seiten. 1953. Halbleinen DM 16,—

„Das Werk hat einen vorzüglichen Aufbau und eine persönliche Note, die sich in der leichtverständlichen Schreibweise, den guten Abbildungen und besonders in den zahlreichen Beispielrechnungen dokumentiert. Es wird eine umfassende Einführung in die Gleich- und Wechselstrom-Technik gegeben, der sich in einem zweiten Teil die elektrische Meßtechnik anschließt. Die saubere Arbeit hält eine gute Mitte zwischen ‚zu hoch' und ‚zu niedrig'; sie wird darum den technischen Berufen eine sichere und gute Grundlage beim Selbststudium dieses Lehrfaches bauen."

Allgemeine Schlosser- und Maschinenbauer-Zeitung

G. MAIER

Die Grundlagen der Elektrotechnik

2., vollständig umgearbeitete und vermehrte Auflage. Groß-Oktav. Mit 397 Textabbildungen und 164 durchgerechneten Beispielen. 527 Seiten. 1950. Halbleinen DM 12,—

„Das Buch, das wohl für den Studierenden einer Ingenieurschule gedacht ist, aber auch dem Hochschulstudenten als Einführung in die Berechnung der Probleme der Elektrotechnik dienen kann, zeichnet sich durch klaren Aufbau und gutverständliche Darstellung aus. Die Ausführungen werden durch eine große Zahl von Textabbildungen unterstützt.

Als besonderer Vorzug... ist die große Zahl der vollständig durchgerechneten Beispiele anzusehen. Sie sind am Schluß des Buches in besonderen Abschnitten zusammengefaßt."

Fernmeldetechnische Zeitschrift

TECHNISCHER VERLAG HERBERT CRAM, BERLIN W 35

SAMMLUNG GÖSCHEN

GESAMTVERZEICHNIS

Jeder Band DM 3,60 · Doppelband DM 5,80

Februar 1963

WALTER DE GRUYTER & CO., BERLIN 30

Inhaltsübersicht

Biologie 16
Botanik 16
Chemie 15
Deutsche Sprache u. Literatur 7
Elektrotechnik 19
Englisch 8
Erd- u. Länderkunde 10
Geologie 18
Germanisch 8
Geschichte 5
Griechisch 9
Hebräisch 9
Hoch- u. Tiefbau 22
Indogermanisch 8
Kartographie 10
Kristallographie 18
Kunst 5
Land- u. Forstwirtschaft . . 18
Lateinisch 9
Maschinenbau 20
Mathematik 12
Mineralogie 18
Musik 5
Pädagogik 4
Philosophie 3
Physik 14
Psychologie 4
Publizistik 10
Religion 4
Romanisch 8
Russisch 9
Sanskrit 9
Soziologie 4
Statistik 10
Technik 19
Technologie 16
Volkswirtschaft 10
Vermessungswesen 22
Wasserbau 21
Zoologie 17
Autorenregister 30
Bandnummernfolge 24

Geisteswissenschaften

Philosophie

Einführung in die Philosophie von *H. Leisegang †*. 5. Auflage. 145 Seiten. 1963. In Vorbereitung (281)

Hauptprobleme der Philosophie von *G. Simmel †*. 7., unveränderte Auflage. 177 Seiten. 1950. (500)

Geschichte der Philosophie

I: Die griechische Philosophie von *W. Capelle*. 1. Teil. Von Thales bis Leukippos. 2., erweiterte Auflage. 135 Seiten. 1953. (857)

II: Die griechische Philosophie von *W. Capelle*. 2. Teil. Von der Sophistik bis zum Tode Platons. 2., stark erweiterte Auflage. 144 Seiten. 1953. (858)

III: Die griechische Philosophie von *W. Capelle*. 3. Teil. Vom Tode Platons bis zur Alten Stoa. 2., stark erweiterte Auflage. 132 Seiten. 1954. (859)

IV: Die griechische Philosophie von *W. Capelle*. 4. Teil. Von der Alten Stoa bis zum Eklektizismus im 1. Jh. v. Chr. 2., stark erweiterte Auflage. 132 Seiten. 1954. (863)

V: Die Philosophie des Mittelalters von *J. Koch*. In Vorbereitung. (826)

VI: Von der Renaissance bis Kant von *K. Schilling*. 234 Seiten. 1954. (394/394a)

VII: Immanuel Kant von *G. Lehmann*. In Vorbereitung. (536)

VIII: Die Philosophie des 19. Jahrhunderts von *G. Lehmann*. 1. Teil. 151 Seiten. 1953. (571)

IX: Die Philosophie des 19. Jahrhunderts von *G. Lehmann*. 2. Teil. 168 Seiten. 1953. (709)

X: Die Philosophie im ersten Drittel des 20. Jahrhunderts 1. Teil von *G. Lehmann*. 128 Seiten. 1957. (845)

XI: Die Philosophie im ersten Drittel des 20. Jahrhunderts 2. Teil von *G. Lehmann*. 114 Seiten. 1960. (850)

Die geistige Situation der Zeit (1931) von *K. Jaspers*. 5., unveränderter Abdruck der im Sommer 1932 bearbeiteten 5. Auflage. 211 Seiten. 1960. (1000)

Erkenntnistheorie von *G. Kropp*.
1. Teil: Allgemeine Grundlegung. 143 Seiten. 1950. (807)

Formale Logik von *P. Lorenzen*. 2., verbesserte Auflage. 165 Seiten. 1962. (1176/1176a)

Philosophisches Wörterbuch von *M. Apel †*. 5., völlig neubearbeitete Auflage von *P. Ludz*. 315 Seiten. 1958. (1031/1031a)

Philosophische Anthropologie. Menschliche Selbstdeutung in Geschichte und Gegenwart von *M. Landmann*. 266 Seiten. 1955. (156/156a)

Pädagogik, Psychologie, Soziologie

Geschichte der Pädagogik von *Herm. Weimer*. 15., neubearbeitete und vermehrte Auflage von *Heinz Weimer*. 184 Seiten. 1962. (145)

Therapeutische Psychologie. Ihr Weg durch die Psychoanalyse von *W. M. Kranefeldt*. Mit einer Einführung von *C. G. Jung*. 3. Auflage. 152 Seiten. 1956. (1034)

Allgemeine Psychologie von *Th. Erismann* †. 4 Bände. 2., neubearbeitete Auflage.

I: Grundprobleme. 146 Seiten. 1958. (831)

II: Grundarten des psychischen Geschehens. 248 Seiten. 1959. (832/832a)

III: Experimentelle Psychologie und ihre Grundlagen. 1. Teil. 112 Seiten, 7 Abbildungen. 1962. (833)

IV: Experimentelle Psychologie und ihre Grundlagen. 2. Teil. 199 Seiten, 20 Abbildungen. 1962. (834/834a)

Soziologie. Geschichte und Hauptprobleme von *L. von Wiese*. 6. Auflage. 175 Seiten. 1960. (101)

Ideengeschichte der sozialen Bewegung des 19. und 20. Jh. von *W. Hofmann*. 243 Seiten. 1962. (1205/1205a)

Sozialpsychologie von *P. R. Hofstätter*. 181 Seiten, 15 Abbildungen, 22 Tabellen. 1956. (104/104a)

Psychologie des Berufs- und Wirtschaftslebens von *W. Moede* †. 190 Seiten, 48 Abbildungen. 1958. (851/851a)

Industrie- und Betriebssoziologie von *R. Dahrendorf*. 2., umgearbeitete und erweiterte Auflage. 142 Seiten, 3 Figuren. 1962. (103)

Einführung in die Sozialethik von *H.-D. Wendland*. 144 Seiten. 1963. (1203)

Religion

Jesus von *M. Dibelius* †. 3. Auflage, mit einem Nachtrag von *W. G. Kümmel*. 140 Seiten. 1960. (1130)

Paulus von *M. Dibelius* †. Nach dem Tode des Verfassers herausgegeben und zu Ende geführt von *W. G. Kümmel*. 2., durchgesehene Auflage. 155 Seiten. 1956. (1160)

Luther von *F. Lau*. 151 Seiten. 1959. (1187)

Melanchthon von *R. Stupperich*. 139 Seiten. 1960. (1190)

Einführung in die Konfessionskunde der orthodoxen Kirchen von *K. Onasch*. 291 Seiten. 1962. (1197/1197a)

Geschichte des christlichen Gottesdienstes von *W. Nagel*. 215 Seiten. 1962. (1202/1202a)

Geschichte Israels. Von den Anfängen bis zur Zerstörung des Tempels (70 n. Chr.) von *E. L. Ehrlich*. 158 Seiten, 1 Tafel. 1958. (231/231a)

Römische Religionsgeschichte von *F. Altheim*. 2 Bände. 2., umgearbeitete Auflage.

I: Grundlagen und Grundbegriffe. 116 Seiten. 1956. (1035)

II: Der geschichtliche Ablauf. 164 Seiten. 1956. (1052)

Die Religion des Buddhismus von *D. Schlingloff*. 2 Bände.

I: Der Heilsweg des Mönchtums. 122 Seiten, 11 Abbildungen, 1 Karte. 1962. (174)

II: Der Heilsweg für die Welt. In Vorbereitung. (770)

Musik

Musikästhetik von *H. J. Moser*. 180 Seiten. Mit zahlreichen Notenbeispielen. 1953. (344)

Systematische Modulation von *R. Hernried*. 2. Auflage. 136 Seiten. Mit zahlreichen Notenbeispielen. 1950. (1094)

Der polyphone Satz von *E. Pepping*. 2 Bände.
I: Der cantus-firmus-Satz. 2. Auflage. 223 Seiten. Mit zahlreichen Notenbeispielen. 1950. (1148)
II: Übungen im doppelten Kontrapunkt und im Kanon. 137 Seiten. Mit zahlreichen Notenbeispielen. 1957. (1164/1164a)

Allgemeine Musiklehre von *H. J. Moser*. 2., durchgesehene Auflage. 155 Seiten. Mit zahlreichen Notenbeispielen. 1955. (220/220a)

Harmonielehre von *H. J. Moser*. 2 Bände.
I: 109 Seiten. Mit 120 Notenbeispielen. 1954. (809)

Die Musik des 19. Jahrhunderts von *W. Oehlmann*. 180 Seiten. 1953. (170)

Die Musik des 20. Jahrhunderts von *W. Oehlmann*. 312 Seiten. 1961. (171/171a)

Technik der deutschen Gesangskunst von *H. J. Moser*. 3., durchgesehene und verbesserte Auflage. 144 Seiten, 5 Figuren sowie Tabellen und Notenbeispiele. 1954. (576/576a)

Die Kunst des Dirigierens von *H. W. von Waltershausen †*. 2., vermehrte Auflage. 138 Seiten. Mit 19 Notenbeispielen. 1954. (1147)

Die Technik des Klavierspiels aus dem Geiste des musikalischen Kunstwerkes von *K. Schubert †*. 3. Auflage. 110 Seiten. Mit Notenbeispielen. 1954. (1045)

Kunst

Stilkunde von *H. Weigert*. 2 Bände. 3., durchgesehene und ergänzte Auflage.
I: Vorzeit, Antike, Mittelalter. 136 Seiten, 94 Abbildungen. 1958. (80)
II: Spätmittelalter und Neuzeit. 150 Seiten, 88 Abbildungen. 1958. (781)

Archäologie von *A. Rumpf*. 2 Bände.
I: Einleitung, historischer Überblick. 143 Seiten, 6 Abbildungen, 12 Tafeln. 1953. (538)
II: Die Archäologensprache. Die antiken Reproduktionen. 136 Seiten, 7 Abbildungen, 12 Tafeln. 1956. (539)

Geschichte

Einführung in die Geschichtswissenschaft von *P. Kirn*. 4., durchgesehene Auflage. 127 Seiten. 1963. (270)

Einführung in die Zeitgeschichte von *B. Scheurig*. 101 Seiten. 1962. (1204)

Zeitrechnung der römischen Kaiserzeit, des Mittelalters und der Neuzeit für die Jahre 1—2000 n. Chr. von *H. Lietzmann †*. 3. Auflage, durchgesehen von *K. Aland*. 130 Seiten. 1956. (1085)

Kultur der Urzeit von *F. Behn*. 3 Bände. 4. Auflage der Kultur der Urzeit Bd. 1—3 von *M. Hoernes*.
I: Die vormetallischen Kulturen. (Die Steinzeiten Europas. Gleichartige Kulturen in anderen Erdteilen.) 172 Seiten, 48 Abbildungen. 1950. (564)
II: Die älteren Metallkulturen. (Der Beginn der Metallbenutzung, Kupfer- und Bronzezeit in Europa, im Orient und in Amerika.) 160 Seiten, 67 Abbildungen. 1950. (565)
III: Die jüngeren Metallkulturen. (Das Eisen als Kulturmetall, Hallstatt-Latène-Kultur in Europa. Das erste Auftreten des Eisens in den anderen Weltteilen.) 149 Seiten, 60 Abbildungen. 1950. (566)

Vorgeschichte Europas von *F. Behn*. Völlig neue Bearbeitung der 7. Auflage der „Urgeschichte der Menschheit" von *M. Hoernes*. 125 Seiten, 47 Abbildungen. 1949. (42)

Der Eintritt der Germanen in die Geschichte von *J. Haller †*. 3. Auflage, durchgesehen von *H. Dannenbauer*. 120 Seiten, 6 Kartenskizzen. 1957. (1117)

Von den Karolingern zu den Staufern. Die altdeutsche Kaiserzeit (900—1250) von *J. Haller †*. 4., durchgesehene Auflage von *H. Dannenbauer*. 142 Seiten, 4 Karten. 1958. (1065)

Von den Staufern zu den Habsburgern. Auflösung des Reichs und Emporkommen der Landesstaaten (1250—1519) von *J. Haller †*. 2., durchgesehene Auflage von *H. Dannenbauer*. 118 Seiten, 6 Kartenskizzen. 1960. (1077)

Deutsche Geschichte im Zeitalter der Reformation, der Gegenreformation und des dreißigjährigen Krieges von *F. Hartung*. 2., durchgesehene Auflage. 128 Seiten. 1963. (1105)

Deutsche Geschichte von 1648—1740. Politischer und geistiger Wiederaufbau von *W. Treue*. 120 Seiten. 1956. (35)

Deutsche Geschichte von 1713—1806. Von der Schaffung des europäischen Gleichgewichts bis zu Napoleons Herrschaft von *W. Treue*. 168 Seiten. 1957. (39)

Deutsche Geschichte von 1806—1890. Vom Ende des alten bis zur Höhe des neuen Reiches von *W. Treue*. 128 Seiten. 1961. (893)

Deutsche Geschichte von 1890 bis zur Gegenwart von *W. Treue*. In Vorbereitung. (894)

Quellenkunde der Deutschen Geschichte im Mittelalter (bis zur Mitte des 15. Jahrhunderts) von *K. Jacob †*. 3 Bände.
I: Einleitung. Allgemeiner Teil. Die Zeit der Karolinger. 6. Auflage, bearbeitet von *H. Hohenleutner*. 127 Seiten. 1959. (279)
II: Die Kaiserzeit (911—1250). 5. Auflage, neubearbeitet von *H. Hohenleutner*. 141 Seiten. 1961. (280)
III: Das Spätmittelalter (vom Interregnum bis 1500). Herausgegeben von *F. Weden*. 152 Seiten. 1952. (284)

Geschichte Englands von *H. Preller*. 2 Bände.
I: bis 1815. 3., stark umgearbeitete Auflage. 135 Seiten, 7 Stammtafeln, 2 Karten. 1952. (375)
II: Von 1815 bis 1910. 2., völlig umgearbeitete Auflage. 118 Seiten, 1 Stammtafel, 7 Karten. 1954. (1088)

Römische Geschichte von *F. Altheim*. 4 Bände. 2., verbesserte Auflage.
I: Bis zur Schlacht bei Pydna (168 v.Chr.). 124 Seiten. 1956. (19)
II: Bis zur Schlacht bei Actium (31 v.Chr.). 129 Seiten. 1956. (677)
III: Bis zur Schlacht an der Milvischen Brücke (312 n.Chr.). 148 Seiten. 1958. (679)
IV: Bis zur Schlacht am Yarmuk (636 n.Chr.). In Vorbereitung. (684)

Geschichte der Vereinigten Staaten von Amerika von *O. Graf zu Stolberg-Wernigerode*. 192 Seiten, 10 Karten. 1956. (1051/1051a)

Deutsche Sprache und Literatur

Geschichte der Deutschen Sprache von *H. Sperber*. 4. Auflage, besorgt von *W. Fleischhauer*. 128 Seiten. 1963. In Vorbereitung. (915)

Deutsches Rechtschreibungswörterbuch von *M. Gottschald †*. 2., verbesserte Auflage. 219 Seiten. 1953. (200/200a)

Deutsche Wortkunde. Kulturgeschichte des deutschen Wortschatzes von *A. Schirmer*. 4. Auflage von *W. Mitzka*. 123 Seiten. 1960. (929)

Deutsche Sprachlehre von *W. Hofstaetter*. 10. Auflage. Völlige Umarbeitung der 8. Auflage. 150 Seiten. 1960. (20)

Stimmkunde für Beruf, Kunst und Heilzwecke von *H. Biehle*. 111 Seiten. 1955. (60)

Redetechnik. Einführung in die Rhetorik von *H. Biehle*. 2., erweiterte Auflage. 151 Seiten. 1961. (61)

Sprechen und Sprachpflege (Die Kunst des Sprechens) von *H. Feist*. 2., verbesserte Auflage. 99 Seiten, 25 Abbildungen. 1952. (1122)

Deutsches Dichten und Denken von der germanischen bis zur staufischen Zeit von *H. Naumann †*. (Deutsche Literaturgeschichte vom 5.—13. Jahrhundert.) 2., verbesserte Auflage. 166 Seiten. 1952. (1121)

Deutsches Dichten und Denken vom Mittelalter zur Neuzeit von *G. Müller* (1270 bis 1700). 3., durchgesehene Auflage. 159 Seiten. 1963. In Vorbereitung. (1086)

Deutsches Dichten und Denken von der Aufklärung bis zum Realismus (Deutsche Literaturgeschichte von 1700—1890) von *K. Vietor †*. 3., durchgesehene Auflage. 159 Seiten. 1958. (1096)

Der Nibelunge Nôt in Auswahl mit kurzem Wörterbuch von *K. Langosch*. 10., durchgesehene Auflage. 164 Seiten. 1956. (1)

Kudrun und Dietrich-Epen in Auswahl mit Wörterbuch von *O. L. Jiriczek*. 6. Auflage, bearbeitet von *R. Wisniewski*. 173 Seiten. 1957. (10)

Wolfram von Eschenbach. Parzival. Eine Auswahl mit Anmerkungen und Wörterbuch von *H. Jantzen*. 2. Auflage, bearbeitet von *H. Kolb*. 128 Seiten. 1957. (921)

Hartmann von Aue. Der arme Heinrich nebst einer Auswahl aus der „Klage", dem „Gregorius" und den Liedern (mit einem Wörterverzeichnis) herausgegeben von *F. Maurer*. 96 Seiten. 1958. (18)

Gottfried von Strassburg in Auswahl herausgegeben von *F. Maurer*. 142 Seiten. 1959. (22)

Die deutschen Personennamen von *M. Gottschald †*. 2., verbesserte Auflage. 151 Seiten. 1955. (422)

Althochdeutsches Elementarbuch. Grammatik und Texte von *H. Naumann †* und *W. Betz*. 3., verbesserte und vermehrte Auflage. 183 Seiten. 1962. (1111/1111a)

Mittelhochdeutsche Grammatik von *H. de Boor* und *R. Wisniewski*. 3., verbesserte und ergänzte Auflage. 150 Seiten. 1963. (1108)

Indogermanisch, Germanisch

Indogermanische Sprachwissenschaft von *H. Krahe*. 2 Bände. 4., überarbeitete Auflage.
I: Einleitung und Lautlehre. 110 Seiten. 1962. (59)
II: Formenlehre. 124 Seiten. 1963. (64)

Gotisches Elementarbuch. Grammatik, Texte mit Übersetzung und Erläuterungen von *H. Hempel*. 3., umgearbeitete Auflage. 166 Seiten. 1962. (79/79a)

Germanische Sprachwissenschaft von *H. Krahe*. 2 Bände.
I: Einleitung und Lautlehre. 5., überarbeitete Auflage. 149 Seiten. 1963. (238)
II: Formenlehre. 4., überarbeitete Auflage. 149 Seiten. 1961. (780)

Altnordisches Elementarbuch. Schrift, Sprache, Texte mit Übersetzung und Wörterbuch von *F. Ranke*. 2., durchgesehene Auflage. 146 Seiten. 1949. (1115)

Englisch, Romanisch

Altenglisches Elementarbuch. Einführung, Grammatik, Texte mit Übersetzung und Wörterbuch von *M. Lehnert*. 5., verbesserte Auflage. 178 Seiten. 1962. (1125)

Historische neuenglische Laut- und Formenlehre von *E. Ekwall*. 3., durchgesehene Auflage. 150 Seiten. 1956. (735)

Englische Phonetik von *H. Mutschmann †*. 2. Auflage. Etwa 117 Seiten. 1963. In Vorbereitung. (601)

Englische Literaturgeschichte von *F. Schubel*. 4 Bände.
I: Die alt- und mittelenglische Periode. 163 Seiten. 1954. (1114)
II: Von der Renaissance bis zur Aufklärung. 160 Seiten. 1956. (1116)
III: Romantik und Viktorianismus. 160 Seiten. 1960. (1124)

Beowulf von *M. Lehnert*. Eine Auswahl mit Einführung, teilweiser Übersetzung, Anmerkungen und etymologischem Wörterbuch. 3., verbesserte Auflage. 135 Seiten. 1959. (1135)

Shakespeare von *P. Meißner †*. 2. Auflage, neubearbeitet von *M. Lehnert*. 136 Seiten. 1954. (1142)

Italienische Literaturgeschichte von *K. Voßler †*. 5. Auflage, neubearbeitet von *A. Noyer-Weidner*. In Vorbereitung. (125)

Romanische Sprachwissenschaft von *H. Lausberg*. 4 Bände.
I: Einleitung und Vokalismus. 2. Auflage. 160 Seiten. 1963. In Vorbereitung. (128/128a)
II: Konsonantismus. 95 Seiten. 1956. (250)
III: Formenlehre. 1. Teil. 99 Seiten. 1962. (1199)
III: Formenlehre. 2. Teil. S. 99—260. 1962. (1200/1200a)
IV: Wortlehre. In Vorbereitung. (1208)

Griechisch, Lateinisch

Griechische Sprachwissenschaft von *W. Brandenstein*. 2 Bände.
I: Einleitung, Lautsystem, Etymologie. 160 Seiten. 1954. (117)
II: Wortbildung und Formenlehre. 192 Seiten. 1959. (118/118a)

Geschichte der griechischen Sprache. 2 Bände.
I: Bis zum Ausgang der klassischen Zeit von *O. Hoffmann †*. 3. Auflage, bearbeitet von *A. Debrunner †*. 156 Seiten. 1953. (111)
II: Grundfragen und Grundzüge des nachklassischen Griechisch von *A. Debrunner †*. 144 Seiten. 1954. (114)

Geschichte der griechischen Literatur von *W. Nestle*. 2. Bände. 3. Auflage, bearbeitet von *W. Liebich*.
I: 144 Seiten. 1961. (70)
II: In Vorbereitung. (557)

Grammatik der neugriechischen Volkssprache von *J. Kalitsunakis*. 3., völlig neubearbeitete und erweiterte Auflage. 197 Seiten. 1963. (756/756a)

Neugriechisch-deutsches Gesprächsbuch von *J. Kalitsunakis*. 2. Auflage, bearbeitet von *A. Steinmetz*. 99 Seiten. 1960. (587)

Geschichte der lateinischen Sprache von *F. Stolz*. 4. Auflage von *A. Debrunner †*. In Vorbereitung. (492)

Geschichte der römischen Literatur von *L. Bieler*. 2 Bände.
I: Die Literatur der Republik. 160 Seiten. 1961. (52)
II: Die Literatur der Kaiserzeit. 133 Seiten. 1961. (866)

Hebräisch, Sanskrit, Russisch

Hebräische Grammatik von *G. Beer †*. 2 Bände. Völlig neubearbeitet von *R. Meyer*.
I: Schrift-, Laut- und Formenlehre I. 3. Auflage. 157 Seiten. In Vorbereitung. (763/763a)
II: Formenlehre II. Syntax und Flexionstabellen. 2. Auflage. 195 Seiten. 1955. (764/764a)

Hebräisches Textbuch zu *G. Beer-R. Meyer*, Hebräische Grammatik von *R. Meyer*. 170 Seiten. 1960. (769/769a)

Sanskrit-Grammatik von *M. Mayrhofer*. 89 Seiten. 1953. (1158)

Russische Grammatik von *E. Berneker †*. 6., verbesserte Auflage vor *M. Vasmer †*. 155 Seiten. 1961. (66)

Slavische Sprachwissenschaft von *H. Bräuer*. 2 Bände.
I: Einleitung, Lautlehre. 221 Seiten. 1961. (1191/1191a)

Erd- und Länderkunde, Kartographie

Afrika von *F. Jaeger*. Ein geographischer Überblick. 2 Bände. 3. Auflage.
I: Der Lebensraum. 179 Seiten, 18 Abbildungen. 1963. In Vorbereitung. (910)
II: Mensch und Kultur. 155 Seiten, 6 Abbildungen. 1963. In Vorbereitung. (911)

Australien und Ozeanien von *H. J. Krug*. 176 Seiten, 46 Skizzen. 1953. (319)

Kartographie von *V. Heissler*. 213 Seiten, 125 Abb., 8 Anlagen. 1962. (30/30a)

Volkswirtschaft, Statistik, Publizistik

Allgemeine Betriebswirtschaftslehre von *K. Mellerowicz*. 4 Bände. 11., durchgesehene Auflage.
I: 224 Seiten. 1961. (1008/1008a)
II: 188 Seiten. 1962. (1153/1153a)
III: 260 Seiten. 1963. (1154/1154a)
IV: 209 Seiten. 1963. (1186/1186a)

Geschichte der Volkswirtschaftslehre von *S. Wendt*. 182 Seiten. 1961. (1194)

Allgemeine Volkswirtschaftslehre von *A. Paulsen*. 4 Bände.
I: Grundlegung, Wirtschaftskreislauf. 4., neubearbeitete Auflage. 154 Seiten. 1962. (1169)
II: Haushalte, Unternehmungen, Marktformen. 4., neubearbeitete Auflage. 168 Seiten, 32 Abbildungen. 1963. (1170)
III: Produktionsfaktoren. 3. Auflage. 200 Seiten. 1963. (1171)
IV: Gesamtbeschäftigung, Konjunkturen, Wachstum. 2. Auflage. 174 Seiten. 1962. (1172)

Allgemeine Volkswirtschaftspolitik von *H. Ohm*. 2 Bände.
I: Systematisch-Theoretische Grundlegung. 137 Seiten, 6 Abbildungen. 1962. (1195)
II: Der volkswirtschaftliche Gesamtorganismus als Objekt der Wirtschaftspolitik. In Vorbereitung. (1196)

Finanzwissenschaft von *H. Kolms*. 4 Bände.
I: Grundlegung, Öffentliche Ausgaben. 2. Auflage. 160 Seiten. 1963. In Vorbereitung. (148)
II: Erwerbseinkünfte, Gebühren und Beiträge; Allgemeine Steuerlehre. 148 Seiten. 1960. (391)
III: Besondere Steuerlehre. 178 Seiten. 1962. (776)
IV: Öffentlicher Kredit. Haushaltswesen. Finanzausgleich. In Vorbereitung. (782)

Finanzmathematik von *M. Nicolas*. 192 Seiten, 11 Tafeln, 8 Tabellen und 72 Beispiele. 1959. (1183/1183a)

Industrie- und Betriebssoziologie von *R. Dahrendorf*. 2., umgearbeitete und erweiterte Auflage. 142 Seiten, 3 Figuren. 1962. (103)

Wirtschaftssoziologie von *F. Fürstenberg*. 122 Seiten. 1961. (1193)

Psychologie des Berufs- und Wirtschaftslebens von *W. Moede †*. 190 Seiten, 48 Abbildungen. 1958. (851/851a)

Allgemeine Methodenlehre der Statistik von *J. Pfanzagl*. 2 Bände.
I: Elementare Methoden unter besonderer Berücksichtigung der Anwendungen in den Wirtschafts- und Sozialwissenschaften. 2. Auflage. Etwa 205 Seiten, 35 Abbildungen. 1963. (746/746a)
II: Höhere Methoden unter besonderer Berücksichtigung der Anwendungen in Naturwissenschaft, Medizin und Technik. 295 Seiten, 39 Abbildungen. 1962. (747/747a)

Zeitungslehre von *E. Dovifat*. 2 Bände. 4., neubearbeitete Auflage.
I: Theoretische und rechtliche Grundlagen — Nachricht und Meinung — Sprache und Form. 149 Seiten. 1962. (1039)
II: Redaktion — Die Sparten: Verlag und Vertrieb, Wirtschaft und Technik — Sicherung der öffentlichen Aufgabe. 168 Seiten. 1962. (1040)

Naturwissenschaften

Mathematik

Geschichte der Mathematik von *J. E. Hofmann*. 4 Bände.
I: Von den Anfängen bis zum Auftreten von Fermat und Descartes. 2., verbesserte und vermehrte Auflage. 200 Seiten. 1963. (226/226a)
II: Von Fermat und Descartes bis zur Erfindung des Calculus und bis zum Ausbau der neuen Methoden. 109 Seiten. 1957. (875)
III: Von den Auseinandersetzungen um den Calculus bis zur französischen Revolution. 107 Seiten. 1957. (882)
IV: Geschichte der Mathematik der neuesten Zeit von *N. Stuloff*. In Vorbereitung. (883)

Mathematische Formelsammlung von *F. O. Ringleb*. 7., erweiterte Auflage. 320 Seiten, 40 Figuren. 1960. (51/51a)

Vierstellige Tafeln und Gegentafeln für logarithmisches und trigonometrisches Rechnen in zwei Farben zusammengestellt von *H. Schubert* und *R. Haussner*. 3., neubearbeitete Auflage von *J. Erlebach*. 158 Seiten. 1960. (81)

Fünfstellige Logarithmen mit mehreren graphischen Rechentafeln und häufig vorkommenden Zahlenwerten von *A. Adler*. 4. Auflage, überarbeitet von *J. Erlebach*. 127 Seiten, 1 Tafel. 1962. (423)

Arithmetik von *P. B. Fischer †*. 3. Auflage von *H. Rohrbach*. 152 Seiten, 19 Abbildungen. 1958. (47)

Höhere Algebra von *H. Hasse*. 2 Bände.
I: Lineare Gleichungen. 5., neubearbeitete Auflage. 150 Seiten. 1963. (931)
II: Gleichungen höheren Grades. 4., durchgesehene Auflage. 158 Seiten, 5 Figuren. 1958. (932)

Aufgabensammlung zur höheren Algebra von *H. Hasse* und *W. Klobe*. 3., verbesserte Auflage. 183 Seiten. 1961. (1082)

Elementare und klassische Algebra vom modernen Standpunkt von *W. Krull*. 2 Bände.
I: 3., erweiterte Auflage. 136 Seiten. 1963. In Vorbereitung. (930)
II: 132 Seiten. 1959. (933)

Algebraische Kurven und Flächen von *W. Burau*. 2 Bände.
I: Algebraische Kurven der Ebene. 153 Seiten, 28 Abbildungen. 1962. (435)
II: Algebraische Flächen 3. Grades und Raumkurven 3. und 4. Grades. 162 Seiten, 17 Abbildungen. 1962. (436/436a)

Einführung in die Zahlentheorie von *A. Scholz †*. Überarbeitet und herausgegeben von *B. Schoeneberg*. 3. Auflage. 128 Seiten. 1961. (1131)

Formale Logik von *P. Lorenzen*. 2., verbesserte Auflage. 165 Seiten. 1962. (1176/1176a)

Topologie von *W. Franz*. 2 Bände.
I: Allgemeine Topologie. 144 Seiten, 9 Figuren. 1960. (1181)
II: Algebraische Topologie. In Vorbereitung. (1182)

Elemente der Funktionentheorie von *K. Knopp †*. 6. Auflage. 144 Seiten, 23 Figuren. 1963. In Vorbereitung. (1109)

Funktionentheorie von *K. Knopp †*. 2 Bände. 10. Auflage.

I: Grundlagen der allgemeinen Theorie der analytischen Funktionen. 144 Seiten, 8 Figuren. 1961. (668)

II: Anwendungen und Weiterführung der allgemeinen Theorie. 130 Seiten, 7 Figuren. 1962. (703)

Aufgabensammlung zur Funktionentheorie von *K. Knopp †*. 2 Bände.

I: Aufgaben zur elementaren Funktionentheorie. 6. Auflage. 135 Seiten. 1962. (877)

II: Aufgaben zur höheren Funktionentheorie. 5. Auflage. 151 Seiten. 1959. (878)

Differential- und Integralrechnung von *M. Barner*. (Früher *Witting*). 4 Bände.

I: Grenzwertbegriff, Differentialrechnung. 2. Auflage. Etwa 176 Seiten. 1963. In Vorbereitung. (86/86a)

Gewöhnliche Differentialgleichungen von *G. Hoheisel*. 6., neubearbeitete und erweiterte Auflage. 128 Seiten. 1960. (920)

Partielle Differentialgleichungen von *G. Hoheisel*. 4., durchgesehene Auflage. 128 Seiten. 1960. (1003)

Aufgabensammlung zu den gewöhnlichen und partiellen Differentialgleichungen von *G. Hoheisel*. 4., durchgesehene und verbesserte Auflage. 124 Seiten. 1958. (1059)

Integralgleichungen von *G. Hoheisel*. 2., durchgesehene Auflage. Etwa 125 Seiten. 1963. (1099)

Mengenlehre von *E. Kamke*. 4., verbesserte Auflage. 194 Seiten, 6 Figuren. 1962. (999/999a)

Gruppentheorie von *L. Baumgartner*. 3., neubearbeitete Auflage. 110 Seiten, 3 Tafeln. 1958. (837)

Ebene und sphärische Trigonometrie von *G. Hessenberg †*. 5. Auflage, durchgesehen von *H. Kneser*. 172 Seiten, 60 Figuren. 1957. (99)

Darstellende Geometrie von *W. Haack*. 3 Bände.

I: Die wichtigsten Darstellungsmethoden. Grund- und Aufriß ebenflächiger Körper. 4., durchgesehene und ergänzte Auflage. 113 Seiten, 120 Abbildungen. 1963. (142)

II: Körper mit krummen Begrenzungsflächen. Kotierte Projektionen. 3., durchgesehene Auflage. 129 Seiten, 86 Abbildungen. 1962. (143)

III: Axonometrie und Perspektive. 2., durchgesehene und ergänzte Auflage. 129 Seiten, 100 Abbildungen. 1962. (144)

Analytische Geometrie von *K. P. Grotemeyer*. 2., erweiterte Auflage. 218 Seiten, 73 Abbildungen. 1962. (65/65a)

Nichteuklidische Geometrie. Hyperbolische Geometrie der Ebene von *R. Baldus †*. Durchgesehen und herausgegeben von *F. Löbell*. 3., verbesserte Auflage. 140 Seiten, 70 Figuren. 1953. (970)

Differentialgeometrie von *K. Strubecker* (früher *Rothe*). 3 Bände.

I: Kurventheorie der Ebene und des Raumes. 150 Seiten, 18 Figuren. 1955. (1113/1113a)

II: Theorie der Flächenmetrik. 195 Seiten, 14 Figuren. 1958. (1179/1179a)

III: Theorie der Flächenkrümmung. 254 Seiten, 38 Figuren. 1959. (1180/1180a)

Variationsrechnung von *L. Koschmieder*. 2 Bände. 2., neubearbeitete Auflage.
I: Das freie und gebundene Extrem einfacher Grundintegrale. 128 Seiten, 23 Figuren. 1962. (1074)
II: Anwendung klassischer Verfahren auf allgemeine Fragen des Extrems. — Neuere unmittelbare Verfahren. In Vorbereitung. (1075)

Einführung in die konforme Abbildung von *L. Bieberbach*. 5., erweiterte Auflage. 180 Seiten, 42 Figuren. 1956. (768/768a)

Vektoren und Matrizen von *S. Valentiner*. 2. Auflage. (9., erweiterte Auflage der „Vektoranalysis"). Mit Anhang: Aufgaben zur Vektorrechnung von *H. König*. 202 Seiten, 35 Figuren. 1960. (354/354a)

Versicherungsmathematik von *F. Böhm*. 2 Bände.
I: Elemente der Versicherungsrechnung. 3., vermehrte und verbesserte Auflage. Durchgesehener Neudruck. 151 Seiten. 1953. (180)
II: Lebensversicherungsmathematik. Einführung in die technischen Grundlagen der Sozialversicherung. 2., verbesserte und vermehrte Auflage. 205 Seiten. 1953. (917/917a)

Finanzmathematik von *M. Nicolas*. 192 Seiten, 11 Tafeln, 8 Tabellen und 72 Beispiele. 1959. (1183/1183a)

Physik

Einführung in die theoretische Physik von *W. Döring*. 5 Bände.
I: Mechanik. 2., verbesserte Auflage. 123 Seiten, 25 Abbildungen. 1960. (76)
II: Das elektromagnetische Feld. 2., verbesserte Auflage. 132 Seiten, 15 Abbildungen. 1962. (77)
III: Optik. 2., verbesserte Auflage. 117 Seiten, 32 Abbildungen. 1963. (78)
IV: Thermodynamik. 107 Seiten, 9 Abbildungen. 1956. (374)
V: Statistische Mechanik. 114 Seiten, 12 Abbildungen. 1957. (1017)

Mechanik deformierbarer Körper von *M. Päsler*. 199 Seiten, 48 Abbildungen. 1960. (1189/1189a)

Atomphysik von *K. Bechert, Ch. Gerthsen †* und *A. Flammersfeld*. 7 Bände.
I: Allgemeine Grundlagen. 1. Teil. 4., durchgesehene Auflage von *A. Flammersfeld*. 124 Seiten, 35 Abbildungen. 1959. (1009)
II: Allgemeine Grundlagen. 2. Teil. 4., umgearbeitete Auflage von *A. Flammersfeld*. Etwa 112 Seiten. 1963. (1033)
III: Theorie des Atombaus. 1. Teil von *K. Bechert*. 4., umgearbeitete Auflage. 148 Seiten, 16 Abbildungen. 1963. (1123/1123a)
IV: Theorie des Atombaus. 2. Teil von *K. Bechert*. 4., umgearbeitete Auflage. 170 Seiten, 14 Abbildungen. 1963. In Vorbereitung. (1165/1165a)

Differentialgleichungen der Physik von *F. Sauter*. 3., durchgesehene und ergänzte Auflage. 148 Seiten, 16 Figuren. 1958. (1070)

Physikalische Formelsammlung von *G. Mahler †*. Neubearbeitet von *H. Graewe*. 11. Auflage. 153 Seiten, 69 Figuren. 1963. (136)

Physikalische Aufgabensammlung von *G. Mahler †*. Neubearbeitet von *K. Mahler*. Mit den Ergebnissen. 11. Auflage. 127 Seiten. 1961. (243)

Chemie

Geschichte der Chemie in kurzgefaßter Darstellung von *G. Lockemann*. 2 Bände.
I: Vom Altertum bis zur Entdeckung des Sauerstoffs. 142 Seiten, 8 Bildnisse. 1950. (264)
II: Von der Entdeckung des Sauerstoffs bis zur Gegenwart. 151 Seiten, 16 Bildnisse. 1955. (265/265a)

Anorganische Chemie von *W. Klemm*. 12., neubearbeitete und erweiterte Auflage. 255 Seiten, 34 Abbildungen. 1962. (37/37a)

Organische Chemie von *W. Schlenk*. 9., erweiterte Auflage. 273 Seiten, 16 Abbildungen. 1963. (38/38a)

Physikalische Methoden in der Organischen Chemie von *G. Kresze*. 2 Bände.
I: 119 Seiten, 65 Abbildungen. 1962. (44)
II: 164 Seiten. 1962. (45/45a)

Allgemeine und physikalische Chemie von *W. Schulze*. 2 Bände.
I: 5., durchgesehene Auflage. 139 Seiten, 10 Figuren. 1960. (71)
II: 5., verbesserte Auflage. 178 Seiten, 37 Figuren. 1961. (698/698a)

Einfache Versuche zur allgemeinen und physikalischen Chemie von *E. Dehn*. 371 Versuche mit 40 Abbildungen. 272 Seiten. 1962. (1201/1201a)

Molekülbau. Theoretische Grundlagen und Methoden der Strukturermittlung von *W. Schulze*. 123 Seiten, 43 Figuren. 1958. (786)

Physikalisch-chemische Rechenaufgaben von *E. Asmus*. 3., verbesserte Auflage. 96 Seiten. 1958. (445)

Maßanalyse. Theorie und Praxis der klassischen und der elektrochemischen Titrierverfahren von *G. Jander* und *K. F. Jahr*. 9., durchgesehene Auflage. 313 Seiten, 49 Figuren. 1961. (221/221a)

Qualitative Analyse von *H. Hofmann* u. *G. Jander*. 308 Seiten, 5 Abbildungen. 1960. (247/247a)

Thermochemie von *W. A. Roth †*. 2., verbesserte Auflage. 109 Seiten, 16 Figuren. 1952. (1057)

Stöchiometrische Aufgabensammlung von *W. Bahrdt †* und *R. Scheer*. Mit den Ergebnissen. 7., durchgesehene Auflage. 119 Seiten. 1960. (452)

Elektrochemie von *K. Vetter*. 2 Bände.
I: 1963. In Vorbereitung. (252)
II: 1963. In Vorbereitung. (253)

Technologie

Die Chemie der Kunststoffe von *K. Hamann*, unter Mitarbeit von *W. Funke* und *H. D. Hermann*. 143 Seiten. 1960. (1173)

Warenkunde von *K. Hassak* und *E. Beutel †*. 2 Bände.
I: Anorganische Waren sowie Kohle und Erdöl. 8. Auflage. Neubearbeitet von *A. Kutzelnigg*. 119 Seiten, 18 Figuren. 1958. (222)
II: Organische Waren. 8. Auflage. Vollständig neubearbeitet von *A. Kutzelnigg*. 157 Seiten, 32 Figuren. 1959. (223)

Die Fette und Öle von *Th. Klug*. 6., verbesserte Auflage. 143 Seiten. 1961. (335)

Die Seifenfabrikation von *K. Braun †*. 3., neubearbeitete und verbesserte Auflage von *Th. Klug*. 116 Seiten, 18 Abbildungen. 1953. (336)

Thermische Verfahrenstechnik von *H. Bock*. 3 Bände.
I: Eigenschaften und Verhalten der realen Stoffe. 1963. Im Druck. (1209/1209a)

Textilindustrie von *A. Blümcke*.
I: Spinnerei und Zwirnerei. 111 Seiten, 43 Abbildungen. 1954. (184)

Biologie

Einführung in die allgemeine Biologie und ihre philosophischen Grund- und Grenzfragen von *M. Hartmann*. 132 Seiten, 2 Abbildungen. 1956. (96)

Hormone von *G. Koller*. 2., neubearbeitete und erweiterte Auflage. 187 Seiten, 60 Abbildungen, 19 Tabellen. 1949. (1141)

Fortpflanzung im Tier- und Pflanzenreich von *J. Hämmerling*. 2., ergänzte Auflage. 135 Seiten, 101 Abbildungen. 1951. (1138)

Geschlecht und Geschlechtsbestimmung im Tier- und Pflanzenreich von *M. Hartmann*. 2., verbesserte Auflage. 116 Seiten, 61 Abbildungen, 7 Tabellen. 1951. (1127)

Symbiose der Tiere mit pflanzlichen Mikroorganismen von *P. Buchner*. 2., verbesserte und vermehrte Auflage. 130 Seiten, 121 Abbildungen. 1949. (1128)

Grundriß der Allgemeinen Mikrobiologie von *W. u. A. Schwartz*. 2 Bände. 2., verbesserte und ergänzte Auflage.
I: 147 Seiten, 25 Abbildungen. 1960. (1155)
II: 142 Seiten, 29 Abbildungen. 1961. (1157)

Botanik

Entwicklungsgeschichte des Pflanzenreiches von *H. Heil*. 2. Auflage. 138 Seiten, 94 Abbildungen, 1 Tabelle. 1950. (1137)

Morphologie der Pflanzen von *L. Geitler*., 3., umgearbeitete Auflage. 126 Seiten, 114 Abbildungen. 1953. (141)

Pflanzengeographie von *L. Diels †*. 5., völlig neubearbeitete Auflage von *F. Mattick*. 195 Seiten, 2 Karten. 1958. (389/389a)

Die Laubhölzer. Kurzgefaßte Beschreibung der in Mitteleuropa gedeihenden Laubbäume und Sträucher von *F. W. Neger* † und *E. Münch* †. 3., durchgesehene Auflage, herausgegeben von *B. Huber*. 143 Seiten, 63 Figuren, 7 Tabellen. 1950. (718)

Die Nadelhölzer (Konifere) und übrigen Gymnospermen von *F. W. Neger* † und *E. Münch* †. 4. Auflage, durchgesehen und ergänzt von *B. Huber*. 140 Seiten, 75 Figuren, 4 Tabellen, 3 Karten. 1952. (355)

Pflanzenzüchtung von *H. Kuckuck*. 2 Bände.

I: Grundzüge der Pflanzenzüchtung. 3., völlig umgearbeitete und erweiterte Auflage. 132 Seiten, 22 Abbildungen. 1952. (1134)

II: Spezielle gartenbauliche Pflanzenzüchtung (Züchtung von Gemüse, Obst und Blumen). 178 Seiten, 27 Abbildungen. 1957. (1178/1178a)

Zoologie

Entwicklungsphysiologie der Tiere von *F. Seidel*. 2 Bände.

I: Ei und Furchung. 126 Seiten, 29 Abbildungen. 1953. (1162)

II: Körpergrundgestalt und Organbildung. 159 Seiten, 42 Abbildungen. 1953. (1163)

Das Tierreich

I: Einzeller, Protozoen von *E. Reichenow*. 115 Seiten. 59 Abbildungen. 1956. (444)

II: Schwämme und Hohltiere von *H. J. Hannemann*. 95 Seiten, 80 Abbildungen. 1956. (442)

III: Würmer. Platt-, Hohl-, Schnurwürmer, Kamptozoen, Ringelwürmer, Protracheaten, Bärtierchen, Zungenwürmer von *S. Jaeckel*. 114 Seiten, 36 Abbildungen. 1955. (439)

IV, 1: Krebse von *H. E. Gruner* und *K. Deckert*. 114 Seiten, 43 Abbildungen. 1956. (443)

IV, 2: Spinnentiere (Trilobitomorphen, Fühlerlose) und Tausendfüßler von *A. Kaestner*. 96 Seiten, 55 Abbildungen. 1955. (1161)

IV, 3: Insekten von *H. von Lengerken*. 128 Seiten, 58 Abbildungen. 1953. (594)

V: Weichtiere. Urmollusken, Schnecken, Muscheln und Kopffüßer von *S. Jaeckel*. 92 Seiten. 34 Figuren. 1954. (440)

VI: Stachelhäuter. Tentakulaten, Binnenatmer und Pfeilwürmer von *S. Jaeckel*. 100 Seiten, 46 Abbildungen. 1955. (441)

VII, 1: Manteltiere, Schädellose, Rundmäuler von *Th. Haltenorth*. In Vorbereitung. (448)

VII, 2: Fische von *D. Lüdemann*. 130 Seiten, 65 Abbildungen. 1955. (356)

VII, 3: Lurche (Chordatiere) von *K. Herter*. 143 Seiten, 129 Abbildungen. 1955. (847)

VII, 4: Kriechtiere (Chordatiere) von *K. Herter*. 200 Seiten, 42 Abbildungen. 1960. (447/447a)

VII, 5: Vögel (Chordatiere) von *H.-A. Freye*. 156 Seiten, 69 Figuren. 1960. (869)

VII, 6: Säugetiere (Chordatiere) von *Th. Haltenorth*. In Vorbereitung. (282)

Land- und Forstwirtschaft

Landwirtschaftliche Tierzucht. Die Züchtung und Haltung der landwirtschaftlichen Nutztiere von *H. Vogel.* 139 Seiten, 11 Abbildungen. 1952. (228)

Kulturtechnische Bodenverbesserungen von *O. Fauser.* 2 Bände. 5., verbesserte und vermehrte Auflage.
I: Allgemeines, Entwässerung. 127 Seiten, 49 Abbildungen. 1959. (691)
II: Bewässerung, Ödlandkultur, Flurbereinigung. 159 Seiten, 71 Abbildungen. 1961. (692)

Agrikulturchemie von *K. Scharrer.* 2 Bände.
I: Pflanzenernährung. 143 Seiten. 1953. (329)
II: Futtermittelkunde. 192 Seiten. 1956. (330/330a)

Geologie, Mineralogie, Kristallographie

Geologie von *F. Lotze.* 2., verbesserte Auflage. 178 Seiten, 80 Abbildungen. 1961. (13)

Erzkunde von *H. von Philipsborn.* In Vorbereitung. (1207)

Mineral- und Erzlagerstättenkunde von *H. Huttenlocher †.* 2 Bände.
I: 2. Auflage. 128 Seiten, 34 Abbildungen. In Vorbereitung. (1014)
II: 156 Seiten, 48 Abbildungen. 1954. (1015/1015a)

Allgemeine Mineralogie. 11., erweiterte Auflage der „Mineralogie" von *R. Brauns †*, bearbeitet von *K. F. Chudoba.* 152 Seiten, 143 Textfiguren, 1 Tafel, 3 Tabellen. 1963. (29/29a)

Spezielle Mineralogie. 10., erweiterte Auflage der „Mineralogie„ von *R. Brauns †*, bearbeitet von *K. F. Chudoba.* 170 Seiten, 125 Textfiguren, 4 Tabellen. 1959. (31/31a)

Petrographie (Gesteinskunde) von *W. Bruhns †.* Neubearbeitet von *P. Ramdohr.* 5., erweiterte Auflage. 141 Seiten, 10 Figuren. 1960. (173)

Kristallographie von *W. Bruhns †.* 5. Auflage, neubearbeitet von *P. Ramdohr.* 109 Seiten, 164 Abbildungen. 1958. (210)

Einführung in die Kristalloptik von *E. Buchwald.* 5., verbesserte Auflage. Etwa 138 Seiten, 117 Figuren. 1963. In Vorbereitung. (619)

Lötrohrprobierkunde. Mineraldiagnose mit Lötrohr und Tüpfelreaktion von *M. Henglein.* 4., durchgesehene und erweiterte Auflage. 108 Seiten, 12 Figuren. 1962. (483)

Technik

Graphische Darstellung in Wissenschaft und Technik von *M. Pirani*. 3., erweiterte Auflage bearbeitet von *J. Fischer* unter Benutzung der von *I. Runge* besorgten 2. Auflage. 216 Seiten, 104 Abbildungen. 1957. (728/728a)

Technische Tabellen und Formeln von *W. Müller*. 5., verbesserte und erweiterte Auflage von *E. Schulze*. 165 Seiten, 114 Abbildungen, 99 Tafeln. 1962. (579)

Grundlagen der Straßenverkehrstechnik. Theorie der Leistungsfähigkeit von *E. Engel*. 101 Seiten, 55 Abbildungen. 1962. (1198)

Elektrotechnik

Grundlagen der allgemeinen Elektrotechnik von *O. Mohr*. 2., durchgesehene Auflage. 260 Seiten, 136 Bilder, 14 Tafeln. 1961. (196/196a)

Die Gleichstrommaschine von *K. Humburg*. 2 Bände. 2., durchgesehene Auflage.
I: 102 Seiten, 59 Abbildungen. 1956. (257)
II: 101 Seiten, 38 Abbildungen. 1956. (881)

Die Synchronmaschine von *W. Putz*. 92 Seiten, 64 Bilder. 1962. (1146)

Induktionsmaschinen von *F. Unger*. 2., erweiterte Auflage. 142 Seiten, 49 Abbildungen. 1954. (1140)

Die komplexe Berechnung von Wechselstromschaltungen von *H. H. Meinke*. 3. Auflage. 180 Seiten, 120 Abbildungen. 1963. In Vorbereitung. (1156/1156a)

Theoretische Grundlagen zur Berechnung der Schaltgeräte von *F. Kesselring*. 3. Auflage. 144 Seiten, 92 Abbildungen. 1950. (711)

Einführung in die Technik selbsttätiger Regelungen von *W. zur Megede*. 2., durchgesehene Auflage. 180 Seiten, 86 Abbildungen. 1961. (714/714a)

Elektromotorische Antriebe (Grundlagen für die Berechnung) von *A. Schwaiger*. 3., neubearbeitete Auflage. 96 Seiten, 34 Abbildungen. 1952. (827)

Überspannungen und Überspannungsschutz von *G. Frühauf*. Durchgesehener Neudruck. 122 Seiten, 98 Abbildungen. 1950. (1132)

Elektrische Höchstspannungs-Schaltanlagen von *G. Meiners* und *K. H. Wiesenewsky*. 1963. In Vorbereitung. (796)

Transformatoren von *W. Schäfer*. 4., überarbeitete und ergänzte Auflage. 130 Seiten, 73 Abbildungen. 1962. (952)

Maschinenbau

Metallkunde von *H. Borchers*. 3 Bände. 5. Auflage.
- I: Aufbau der Metalle und Legierungen. 120 Seiten, 90 Abbildungen, 2 Tabellen. 1962. (432)
- II: Eigenschaften, Grundzüge der Form- und Zustandsgebung. Etwa 180 Seiten, 107 Abbildungen, 10 Tabellen. 1963. (433/433a)
- III: Die metallkundlichen Untersuchungsmethoden von *E. Hanke*. In Vorbereitung. (434)

Die Werkstoffe des Maschinenbaues von *A. Thum* † und *C. M. v. Meysenbug*. 2 Bände.
- I: Einführung in die Werkstoffprüfung. 2., neubearbeitete Auflage. 100 Seiten, 7 Tabellen, 56 Abbildungen. 1956. (476)
- II: Die Konstruktionswerkstoffe. 132 Seiten, 40 Abbildungen. 1959. (936)

Dynamik von *W. Müller*. 2 Bände. 2., verbesserte Auflage.
- I: Dynamik des Einzelkörpers. 128 Seiten, 48 Figuren. 1952. (902)
- II: Systeme von starren Körpern. 102 Seiten, 41 Figuren. 1952. (903)

Technische Schwingungslehre von *L. Zipperer*. 2 Bände. 2., neubearbeitete Auflage.
- I: Allgemeine Schwingungsgleichungen, einfache Schwinger. 120 Seiten, 101 Abbildungen. 1953. (953)
- II: Torsionsschwingungen in Maschinenanlagen. 102 Seiten, 59 Abbildungen. 1955. (961/961a)

Werkzeugmaschinen für Metallbearbeitung von *K. P. Matthes*. 2 Bände.
- I: 100 Seiten, 27 Abbildungen, 11 Zahlentafeln, 1 Tafelanhang. 1954. (561)
- II: Fertigungstechnische Grundlagen der neuzeitlichen Metallbearbeitung. 101 Seiten, 30 Abbildungen, 5 Tafeln. 1955. (562)

Das Maschinenzeichnen mit Einführung in das Konstruieren von *W. Tochtermann*. 2 Bände. 4. Auflage.
- I: Das Maschinenzeichnen. 156 Seiten, 75 Tafeln. 1950. (589)
- II: Ausgeführte Konstruktionsbeispiele. 130 Seiten, 58 Tafeln. 1950. (590)

Die Maschinenelemente von *E. A. vom Ende* †. 4., überarbeitete Auflage. 184 Seiten, 179 Figuren, 11 Tafeln. 1963. (3/3a)

Die Maschinen der Eisenhüttenwerke von *L. Engel*. 156 Seiten, 95 Abbildungen. 1957. (583/583a)

Walzwerke von *H. Sedlaczek* † unter Mitarbeit von *F. Fischer* und *M. Buch*. 232 Seiten, 157 Abbildungen. 1958. (580/580a)

Getriebelehre von *P. Grodzinski* †. 2 Bände. 3., neubearbeitete Auflage von *G. Lechner*.
- I: Geometrische Grundlagen. 164 Seiten, 131 Figuren. 1960. (1061)
- II: Angewandte Getriebelehre. In Vorbereitung. (1062)

Kinematik von *H. R. Müller*. 171 Seiten, 75 Figuren. 1963. (584/584a)

Gießereitechnik von *H. Jungbluth*. 2 Bände.
I: Eisengießerei. 126 Seiten, 44 Abbildungen. 1951. (1159)

Die Dampfturbinen. Ihre Wirkungsweise, Berechnung und Konstruktion von *C. Zietemann*. 3 Bände.
I: Theorie der Dampfturbinen. 4. Auflage. 139 Seiten, 48 Abbildungen. 1963. In Vorbereitung. (27⁴)
II: Die Berechnung der Dampfturbinen und die Konstruktion der Einzelteile. 3., verbesserte Auflage. 132 Seiten, 111 Abbildungen. 1956. (715)
III: Die Regelung der Dampfturbinen, die Bauarten, Turbinen für Sonderzwecke, Kondensationsanlagen. 3., verbesserte Auflage. 126 Seiten, 90 Abbildungen. 1956. (716)

Verbrennungsmotoren von *W. Endres*. 3 Bände.
I: Überblick. Motor-Brennstoffe. Verbrennung im Motor allgemein, im Otto- und Diesel-Motor. 153 Seiten, 57 Abbildungen. 1958. (1076/1076a)
II: Die heutigen Typen der Verbrennungskraftmaschine. In Vorbereitung. (1184)
III: Die Einzelteile des Verbrennungsmotors. In Vorbereitung. (1185)

Autogenes Schweißen und Schneiden von *H. Niese*. 5. Auflage, neubearbeitet von *A. Küchler*. 136 Seiten, 71 Figuren. 1953. (499)

Die elektrischen Schweißverfahren von *H. Niese*. 2. Auflage, neubearbeitet von *H. Dienst*. 136 Seiten, 58 Abbildungen. 1955. (1020)

Die Hebezeuge. Entwurf von Winden und Kranen von *G. Tafel*. 2., verbesserte Auflage. 176 Seiten, 230 Figuren. 1954. (414/414a)

Wasserbau

Wasserkraftanlagen von *A. Ludin* unter Mitarbeit von *W. Borkenstein*. 2 Bände.
I: Planung, Grundlagen und Grundzüge. 124 Seiten, 60 Abbildungen. 1955. (665)
II: Anordnung und Ausbildung der Hauptbauwerke. 184 Seiten, 91 Abbildungen. 1958. (666/666a)

Verkehrswasserbau von *H. Dehnert*. 3 Bände.
I: Entwurfsgrundlagen, Flußregelungen. 103 Seiten, 53 Abbildungen. 1950. (585)
II: Flußkanalisierung und Schiffahrtskanäle. 94 Seiten, 60 Abbildungen. 1950. (597)
III: Schleusen und Hebewerke. 98 Seiten, 70 Abbildungen. 1950. (1152)

Wehr- und Stauanlagen von *H. Dehnert*. 134 Seiten, 90 Abbildungen. 1952. (965)

Talsperren von *F. Tölke*. 122 Seiten, 70 Abbildungen. 1953. (1044)

Vermessungswesen

Vermessungskunde von *W. Grossmann*. 3 Bände.

I: Stückvermessung und Nivellieren. 11., verbesserte Auflage. 144 Seiten, 117 Figuren. 1962. (468)

II: Horizontalaufnahmen und ebene Rechnungen. 9. Auflage. Etwa 133 Seiten, 97 Figuren. 1963. In Vorbereitung. (469)

III: Trigonometrische und barometrische Höhenmessung. Tachymetrie und Absteckungen. 7., völlig neubearbeitete Auflage. 136 Seiten, 97 Figuren. 1960. (862)

Kartographie von *V. Heissler*. 213 Seiten, 125 Abbildungen, 8 Anlagen. 1962. (30/30a)

Photogrammetrie von *G. Lehmann*. 189 Seiten, 132 Abbildungen. 1959. (1188/1188a)

Hoch- und Tiefbau

Die wichtigsten Baustoffe des Hoch- und Tiefbaus von *O. Graf †*. 4., verbesserte Auflage. 131 Seiten, 63 Abbildungen. 1953. (984)

Baustoffverarbeitung und Baustellenprüfung des Betons von *A. Kleinlogel*. 2., neubearbeitete und erweiterte Auflage. 126 Seiten, 35 Abbildungen. 1951. (978)

Festigkeitslehre. 2 Bände.

I: Elastizität, Plastizität und Festigkeit der Baustoffe und Bauteile von *W. Gehler †* und *W. Herberg*. Durchgesehener und erweiterter Neudruck. 159 Seiten, 118 Abbildungen. 1952. (1144)

II: Formänderung, Platten, Stabilität und Bruchhypothesen von *W. Herberg* und *N. Dimitrov*. 187 Seiten, 94 Abbildungen. 1955. (1145/1145a)

Grundlagen des Stahlbetonbaus von *A. Troche*. 2., neubearbeitete und erweiterte Auflage. 208 Seiten, 75 Abbildungen, 17 Bemessungstafeln, 20 Rechenbeispiele. 1953. (1078)

Statik der Baukonstruktionen von *A. Teichmann*. 3 Bände.

I: Grundlagen. 101 Seiten, 51 Abbildungen, 8 Formeltafeln. 1956. (119)

II: Statisch bestimmte Stabwerke. 107 Seiten, 52 Abbildungen, 7 Tafeln. 1957. (120)

III: Statisch unbestimmte Systeme. 112 Seiten, 34 Abbildungen, 7 Formeltafeln. 1958. (122)

Fenster, Türen, Tore aus Holz und Metall. Eine Anleitung zu ihrer guten Gestaltung, wirtschaftlichen Bemessung und handwerksgerechten Konstruktion von *W. Wickop †*. 4., überarbeitete und ergänzte Auflage. 155 Seiten, 95 Abbildungen. 1955. (1092)

Heizung und Lüftung von *W. Körting*. 2 Bände. 9., neubearbeitete Auflage.

I: Das Wesen und die Berechnung der Heizungs- und Lüftungsanlagen. 171 Seiten, 29 Abbildungen, 36 Zahlentafeln. 1962. (342/342a)

II: Die Ausführung der Heizungs- und Lüftungsanlagen. 1963. In Vorbereitung. (343)

Industrielle Kraft- und Wärmewirtschaft von *F. A. F. Schmidt* und *A. Beckers*. 167 Seiten, 73 Abbildungen. 1957. (318/318a)

Weitere Sonderverzeichnisse aller
Wissensgebiete und Einzelprospekte,
sowie die Verlagskataloge
aus dem Verlag
WALTER DE GRUYTER & CO.
erhalten Sie jederzeit
bei Ihrem Buchhändler.

Sammlung Göschen / Bandnummernfolge

1 Langosch, Der Nibelunge Nôt
3/3a v. Ende, Maschinenelemente
10 Jiriczek-Wisnlewski, Kudrun- und Dietrich-Epen
13 Lotze, Geologie
18 Maurer, Hartmann von Aue. Der arme Heinrich
19 Altheim, Römische Geschichte I
20 Hofstaetter, Dt. Sprachlehre
22 Maurer, Gottfried von Strassburg
29/29a Brauns-Chudoba, Allgemeine Mineralogie
30/30a Heissler, Kartographie
31/31a Brauns-Chudoba, Spezielle Mineralogie
35 Treue, Dt. Geschichte von 1648—1740
37/37a Klemm, Anorganische Chemie
38/38a Schlenk, Organische Chemie
39 Treue, Dt. Geschichte von 1713—1806
42 Behn-Hoernes, Vorgeschichte Europas
44 Kresze, Physikalische Methoden in der Organischen Chemie I
45/45a Kresze, Physikalische Methoden in der Organischen Chemie II
47 Fischer-Rohrbach, Arithmetik
51/51a Ringleb, Mathem. Formelsammlung
52 Bieler, Röm. Literaturgesch. I
59 Krahe, Indog. Sprachwiss. I
60 Biehle, Stimmkunde
61 Biele, Redetechnik
64 Krahe, Indog. Sprachwiss. II
65/65a Grotemeyer, Analyt. Geometrie
66 Berneker-Vasmer, Russische Grammatik
70 Nestle-Liebich, Gesch. d. griechischen Literatur I
71 Schulze, Allgemeine und physikalische Chemie I
76 Döring, Einf. i. d. th. Physik I
77 Döring, Einf. i. d. th. Physik II
78 Döring, Einf. i. d. th. Physik III
79/79a Hempel, Got. Elementarbuch
80 Weigert, Stilkunde I
81 Schubert-Haussner-Erlebach, Vierstell. Logarithmentafeln
86/86a Barner, Differential- u. Integralrechnung I
96 Hartmann, Einf. in die allgem. Biologie
99 Hessenberg-Kneser, Ebene und sphär. Trigonometrie
101 v. Wiese, Soziologie
103 Dahrendorf, Industrie- und Betriebssoziologie
104/104a Hofstätter, Sozialpsychologie
111 Hoffmann-Debrunner, Gesch. der griechischen Sprache I
114 Debrunner, Gesch. der griechischen Sprache II
117 Brandenstein, Griechische Sprachwissenschaft I
118/118a Brandenstein, Griechische Sprachwissenschaft II
119 Teichmann, Statik der Baukonstruktionen I
120 Teichmann, Statik der Baukonstruktionen II
122 Teichmann, Statik der Baukonstruktionen III
125 Vossler-Noyer-Weidner, Ital. Literaturgeschichte
128/128a Lausberg, Romanische Sprachwissenschaft I

136 Mahler-Graewe, Physikal. Formelsammlung
141 Geitler, Morphologie der Pflanzen
142 Haack, Darst. Geometrie I
143 Haack, Darst. Geometrie II
144 Haack, Darst. Geometrie III
145 Weimer, Gesch. der Pädagogik
148 Kolms, Finanzwissenschaft I
156/156a Landmann, Philosophische Anthropologie
170 Oehlmann, Musik des 19. Jhs.
171/171a Oehlmann, Musik des 20. Jhs.
173 Bruhns-Ramdohr, Petrographie
174 Schlingloff, Religion des Buddhismus I
180 Böhm, Versicherungsmathematik I
184 Blümcke, Textilindustrie I
196/196a Mohr, Grundlagen der allgem. Elektrotechnik
200/200a Gottschald, Dt. Rechtschreibungswörterbuch
210 Bruhns-Ramdohr, Kristallographie
220/220a Moser, Allg. Musiklehre
221/221a Jander-Jahr, Maßanalyse
222 Hassak-Beutel-Kutzelnigg, Warenkunde I
223 Hassak-Beutel-Kutzelnigg, Warenkunde II
226/226a Hofmann, Gesch. der Mathematik I
228 Vogel, Landw. Tierzucht
231/231a Ehrlich, Gesch. Israels
238 Krahe, Germ. Sprachwiss. I
243 Mahler, Physikal. Aufgabensammlung
247/247a Hofmann-Jander, Qualitative Analyse
250 Lausberg, Romanische Sprachwissenschaft II
252 Vetter, Elektrochemie I
253 Vetter, Elektrochemie II
257 Humburg, Gleichstrommaschine I
264 Lockemann, Gesch. der Chemie I
265/265a Lockemann, Geschichte der Chemie II
270 Kirn, Einführung in die Geschichtswissenschaft
274 Zietemann, Dampfturbinen I
279 Jacob-Hohenleutner, Quellenkunde der deutschen Geschichte I
280 Jacob-Hohenleutner, Quellenkunde der deutschen Geschichte II
281 Leisegang, Einführung in die Philosophie
282 Haltenorth, Säugetiere
284 Jacob-Weden, Quellenkunde der deutschen Geschichte III
318/318a Schmidt-Beckers, Industrielle Kraft- u. Wärmewirtschaft
319 Krug, Australien und Ozeanien
329 Scharrer, Agrikulturchemie I
330/330a Scharrer, Agrikulturchemie II
335 Klug, Fette und Öle
336 Braun-Klug, Seifenfabrikation
342/342a Körting, Heizung und Lüftung I
343 Körting, Heizung und Lüftung II
344 Moser, Musikästhetik
354/354a Valentiner-König, Vektoren und Matrizen
355 Neger-Münch-Huber, Nadelhölzer
356 Lüdemann, Fische
374 Döring, Einführung in die theoret. Physik IV
375 Preller, Geschichte Englands I
389/389a Diels-Mattick, Pflanzengeographie
391 Kolms, Finanzwissenschaft II
394/394a Schilling, Von der Renaissance bis Kant
414/414a Tafel, Hebezeuge
422 Gottschald, Dt. Personennamen
423 Adler-Erlebach, Fünfstellige Logarithmen
432 Borchers, Metallkunde I
433/433a Borchers, Metallkunde II
434 Borchers-Hanke, Metallkunde III

435 Burau, Algebr. Kurven u. Flächen I
436/436a Burau, Algebr. Kurven und Flächen II
439 Jaeckel, Würmer
440 Jaeckel, Weichtiere
441 Jaeckel, Stachelhäuter
442 Hannemann, Schwämme und Hohltiere
443 Gruner-Deckert, Krebse
444 Reichenow, Einzeller
445 Asmus, Physikal.-chem. Rechenaufgaben
447/447a Herter, Kriechtiere
448 Haltenorth, Manteltiere
452 Bahrdt-Scheer, Stöchiometrische Aufgabensammlung
468 Grossmann, Vermessungskunde I
469 Grossmann, Vermessungskunde II
476 Thum-Meysenbug, Die Werkstoffe des Maschinenbaues I
483 Henglein, Lötrohrprobierkunde
492 Stolz-Debrunner, Geschichte der lateinischen Sprache
499 Niese-Küchler, Autogenes Schweißen
500 Simmel, Hauptprobleme der Philosophie
536 Lehmann, Kant
538 Rumpf, Archäologie I
539 Rumpf, Archäologie II
557 Nestle-Liebich, Gesch. der griech. Literatur II
561 Matthes, Werkzeugmaschinen I
562 Matthes, Werkzeugmaschinen II
564 Behn-Hoernes, Kultur der Urzeit I
565 Behn-Hoernes, Kultur der Urzeit II
566 Behn-Hoernes, Kultur der Urzeit III
571 Lehmann, Philosophie des 19. Jahrhunderts I
576/576a Moser, Gesangskunst
579 Müller-Schulze, Techn. Tabellen
580/580a Sedlaczek-Fischer-Buch, Walzwerke
583/583a Engel, Maschinen der Eisenhüttenwerke
584/584a Müller, Kinematik
585 Dehnert, Verkehrswasserbau I
587 Kalitsunakis-Steinmetz, Neugriech.-dt. Gesprächsbuch
589 Tochtermann, Maschinenzeichnen I
590 Tochtermann, Maschinenzeichnen II
594 v. Lengerken, Insekten
597 Dehnert, Verkehrswasserbau II
601 Mutschmann, Engl. Phonetik
619 Buchwald, Kristalloptik
665 Ludin-Borkenstein, Wasserkraftanlagen I
666/666a Ludin-Borkenstein, Wasserkraftanlagen II
668 Knopp, Funktionentheorie I
677 Altheim, Röm. Geschichte II
679 Altheim, Röm. Geschichte III
684 Altheim, Röm. Geschichte IV
691 Fauser, Kulturtechn. Bodenverbesserungen I
692 Fauser, Kulturtechn. Bodenverbesserungen II
698/698a Schulze, Allgemeine u. physikalische Chemie II
703 Knopp, Funktionentheorie II
709 Lehmann, Philosophie des 19. Jahrhunderts II
711 Kesselring, Berechnung der Schaltgeräte
714/714a zur Megede, Technik selbsttätiger Regelungen
715 Zietemann, Dampfturbinen II
716 Zietemann, Dampfturbinen III
718 Neger-Münch-Huber, Laubhölzer
728/728a Pirani-Fischer-Runge, Graph. Darstellung in Wissenschaft u. Technik
735 Ekwall, Historische neuengl. Laut- und Formenlehre
746/746a Pfanzagl, Allg. Methodenlehre der Statistik I
747/747a Pfanzagl, Allg. Methodenlehre der Statistik II
756/756a Kalitsunakis, Gramm. d. Neugriech. Volksspr.

763/763a Beer-Meyer, Hebräische Grammatik I
764/764a Beer-Meyer, Hebräische Grammatik II
768/768a Bieberbach, Einführung in die konforme Abbildung
769/769a Beer-Meyer, Hebräisches Textbuch
770 Schlingloff, Religion des Buddhismus II
776 Kolms, Finanzwissensch. III
780 Krahe, German. Sprachwiss. II
781 Weigert, Stilkunde II
782 Kolms, Finanzwissensch. IV
786 Schulze, Molekülbau
796 Meiners-Wiesenewsky, Elektr. Höchstspannungs-Schaltanlagen
807 Kropp, Erkenntnistheorie
809 Moser, Harmonielehre I
826 Koch, Philosophie d. Mittelalters
827 Schwaiger, Elektromotorische Antriebe
831 Erismann, Allg. Psychologie I
832/382a Erismann, Allg. Psychologie II
833 Erismann, Allg. Psychologie III
834/834a Erismann, Allg. Psychologie IV
837 Baumgartner, Gruppentheorie
845 Lehmann, Philosophie im ersten Drittel des 20. Jhs. I
847 Herter, Lurche
850 Lehmann, Philosophie im ersten Drittel des 20. Jhs. II
851/851a Moede, Psychologie des Berufs- und Wirtschaftslebens
857 Capelle, Griech. Philosophie I
858 Capelle, Griech. Philos. II
859 Capelle, Griech. Philos. III
862 Grossmann, Vermessungskunde III
863 Capelle, Griech. Philos. IV
866 Bieler, Röm. Literaturgeschichte II
869 Freye, Vögel
875 Hofmann, Geschichte der Mathematik II
877 Knopp, Aufgabensammlung zur Funktionentheorie I
878 Knopp, Aufgabensammlung zur Funktionentheorie II
881 Humburg, Gleichstrommaschine II
882 Hofmann, Geschichte der Mathematik III
883 Stuloff, Mathematik der neuesten Zeit
893 Treue, Dt. Geschichte von 1806—1890
894 Treue, Dt. Geschichte von 1890 bis zur Gegenwart
902 Müller, Dynamik I
903 Müller, Dynamik II
910 Jaeger, Afrika I
911 Jaeger, Afrika II
915 Sperber-Fleischhauer, Gesch. der Deutschen Sprache
917/917a Böhm, Versicherungsmathematik II
920 Hoheisel, Gewöhnliche Differentialgleichungen
921 Jantzen-Kolb, W. v. Eschenbach. Parzival
929 Schirmer-Mitzka, Dt. Wortkunde
930 Krull, Elementare und klassische Algebra I
931 Hasse, Höhere Algebra I
932 Hasse, Höhere Algebra II
933 Krull, Elementare und klassische Algebra II
936 Thum-Meysenbug, Werkstoffe d. Maschinenbaues II
952 Schäfer, Transformatoren
953 Zipperer, Techn. Schwingungslehre I
961/691a Zipperer, Techn. Schwingungslehre II
965 Dehnert, Wehr- und Stauanlagen
970 Baldus-Löbell, Nichteuklidische Geometrie
978 Kleinlogel, Baustoffverarbeitung und Baustellenprüfung d. Betons
984 Graf, Baustoffe des Hoch- und Tiefbaues
999/999a Kamke, Mengenlehre

1000 Jaspers, Geistige Situat. der Zeit
1003 Hoheisel, Partielle Differentialgleichung
1008/1008a Mellerowicz, Allgem. Betriebswirtschaftslehre I
1009 Bechert-Gerthsen-Flammersfeld, Atomphysik I
1014 Huttenlocher, Mineral- und Erzlagerstättenkunde I
1015/1015a Huttenlocher, Mineral- u. Erzlagerstättenkunde I
1017 Döring, Einführung in die theoret. Physik V
1020 Niese-Dienst, Elektrische Schweißverfahren
1031/1031a Apel-Ludz, Philosophisches Wörterbuch
1033 Bechert-Gerthsen-Flammersfeld, Atomphysik II
1034 Kranefeldt-Jung, Therapeutische Psychologie
1035 Altheim, Röm. Religionsgeschichte I
1039 Dovifat, Zeitungslehre I
1040 Dovifat, Zeitungslehre II
1044 Tölke, Talsperren
1045 Schubert, Technik des Klavierspiels
1051/1051a Stolberg-Wernigerode, Gesch. d. Vereinigten Staaten
1052 Altheim, Röm. Religionsgeschichte II
1057 Roth, Thermochemie
1059 Hoheisel, Aufgabenslg z. d. gew. u. part. Differentialgl.
1061 Grodzinski-Lechner, Getriebelehre I
1062 Grodzinski-Lechner, Getriebelehre II
1065 Haller-Dannenbauer, Von d. Karolingern zu den Staufern
1070 Sauter, Differentialgleichungen der Physik
1074 Koschmieder, Variationsrechnung I
1075 –, Variationsrechnung II
1076/1076a Endres, Verbrennungsmotoren I
1077 Haller-Dannenbauer, Von den Staufern zu den Habsburgern
1078 Troche, Stahlbetonbau
1082 Hasse-Klobe, Aufgabensammlung zur höheren Algebra
1085 Lietzmann-Aland, Zeitrechnung
1086 Müller, Dt. Dichten und Denken
1088 Preller, Gesch. Englands II
1092 Wickop, Fenster, Türen, Tore
1094 Hernried, System. Modulation
1096 Vietor, Dt. Dichten und Denken
1099 Hoheisel, Integralgleichungen
1105 Hartung, Dt. Geschichte im Zeitalter der Reformation
1108 de Boor-Wisniewski, Mittelhochdeutsche Grammatik
1109 Knopp, Elemente der Funktionentheorie
1111/1111a Naumann-Betz, Althochdt. Elementarbuch
1113/1113a Strubecker, Differentialgeometrie I
1114 Schubel, Engl. Literaturgeschichte I
1115 Ranke, Altnord. Elementarbuch
1116 Schubel, Engl. Literaturgeschichte II
1117 Haller-Dannenbauer, Eintritt der Germanen in die Geschichte
1121 Naumann, Dt. Dichten u. Denken
1122 Feist, Sprechen und Sprachpflege
1123/1123a Bechert-Gerthsen-Flammersfeld, Atomphysik III
1124 Schubel, Engl. Literaturgeschichte III
1125 Lehnert, Altengl. Elementarbuch
1127 Hartmann, Geschlecht u. Geschlechtsbestimmung im Tier- und Pflanzenreich
1128 Buchner, Symbiose der Tiere
1130 Dibelius-Kümmel, Jesus
1131 Scholz-Schoeneberg, Einführungin die Zahlentheorie
1132 Frühauf, Überspannungen

1134 Kuckuck, Pflanzenzüchtung I
1135 Lehnert, Beowulf
1137 Heil, Entwicklungsgesch. d. Pflanzenreiches
1138 Hämmerling, Fortpflanzung im Tier- und Pflanzenreich
1140 Unger, Induktionsmaschine
1141 Koller, Hormone
1142 Meissner-Lehnert, Shakespeare
1144 Gehler-Herberg, Festigkeitslehre I
1145/1145a Herberg-Dimitrov, Festigkeitslehre II
1146 Putz, Synchronmaschine
1147 v. Waltershausen, Kunst d. Dirigierens
1148 Pepping, Der polyphone Satz I
1152 Dehnert, Verkehrswasserbau III
1153/1153a Mellerowicz, Allgem. Betriebswirtschaftslehre II
1154/1154a Mellerowicz, Allgem. Betriebswirtschaftslehre III
1155 Schwartz, Mikrobiologie I
1156/1156a Meinke, Komplexe Berechnungen v. Wechselstromschaltungen
1157 Schwartz, Mikrobiologie II
1158 Mayrhofer, Sanskrit-Grammatik
1159 Jungbluth, Gießereitechnik I
1160 Dibelius-Kümmel, Paulus
1161 Kaestner, Spinnentiere
1162 Seidel, Entwicklungsphysiologie der Tiere I
1163 Seidel, Entwicklungsphysiologie der Tiere II
1164/1164a Pepping, Der polyphone Satz II
1165/1165a Bechert-Gerthsen-Flammersfeld, Atomphysik IV
1169 Paulsen, Allgemeine Volkswirtschaftslehre I
1170 Paulsen, II
1171 Paulsen, III
1172 Paulsen, IV
1173 Hamann-Funke-Hermann, Chemie der Kunststoffe
1176/1176a Lorenzen, Form. Logik
1178/1178a Kuckuck, Pflanzenzüchtung II
1179/1179a Strubecker, Differentialgeometrie II
1180/1180a Strubecker, Differentialgeometrie III
1181 Franz, Topologie I
1182 Franz, Topologie II
1183/1183a Nicolas, Finanzmathematik
1184 Endres, Verbrennungsmotoren II
1185 Endres, Verbrennungsmotoren III
1186/1186a Mellerowicz, Allgem. Betriebswirtschaftslehre IV
1187 Lau, Luther
1188/1188a Lehmann, Photogrammetrie
1189/1189a Päsler, Mechanik
1190 Stupperich, Melanchthon
1191/1191a Bräuer, Slav. Sprachwissenschaft I
1193 Fürstenberg, Wirtschaftssoziologie
1194 Wendt, Gesch. d. Volkswirtschaftslehre
1195 Ohm, Allgem. Volkswirtschaftspolitik I
1196 Ohm, — II
1197/1197a Onasch, Einf. in die Konfessionskunde der orthodoxen Kirchen
1198 Engel, Straßenverkehrstechnik
1199 Lausberg, Romanische Sprachwissenschaft III, 1. Teil
1200/1200a Lausberg, Romanische Sprachwissenschaft III, 2. Teil
1201/1201a Dehn, Versuche zur allgem. u. phys. Chemie
1202/1202a Nagel, Gesch. des christl. Gottesdienstes
1203 Wendland, Sozialethik
1204 Scheurig, Zeitgeschichte
1205/1205a Hofmann, Ideengeschichte d. soz. Bewegung
1207 Philipsborn, Erzkunde
1208 Lausberg, Romanische Sprachwissenschaft IV
1209/1209a Bock, Therm. Verfahrenstechnik I

Autorenregister

Adler 12
Aland 5
Altheim 4, 7
Apel 3
Asmus 15

Bahrdt 15
Baldus 13
Barner 13
Baumgartner 13
Bechert 14
Beckers 23
Beer 9
Behn 6
Berneker 9
Betz 8
Beutel 16
Bieberbach 14
Biehle 7
Bieler 9
Blümcke 16
Bock 16
Böhm 14
de Boor 8
Borchers 20
Borkenstein 21
Bräuer 9
Brandenstein 9
Braun 16
Brauns 18
Bruhns 18
Buch 20
Buchner 16
Buchwald 18
Burau 12

Capelle 3
Chudoba 18

Dahrendorf 4, 11
Dannenbauer 6
Debrunner 9
Deckert 17
Dehn 15
Dehnert 21
Dibelius 4
Diels 16
Dienst 21
Dimitrov 22
Döring 14
Dovifat 11

Ehrlich 4
Ekwall 8
Ende, vom 20
Endres 21
Engel, E. 19
Engel, L. 20
Erismann 4
Erlebach 12

Fauser 18
Feist 7
Fischer, F. 20
Fischer, J. 19
Fischer, P. B. 12
Flammersfeld 14
Fleischhauer 7
Franz 12
Freye 17
Frühauf 19
Fürstenberg 11
Funke 16

Gehler 22
Geitler 16
Gerthsen 14
Gottschald 7, 8
Graewe 15
Graf 22
Grodzinski 20
Grossmann 22
Grotemeyer 13
Gruner 17

Haack 13
Hämmerling 16
Haller 6
Haltenorth 17
Hamann 16
Hanke 20
Hannemann 17
Hartmann 16
Hartung 6
Hassak 16
Hasse 12
Haussner 12
Heil 16
Heissler 10, 22
Hempel 8
Henglein 18
Herberg 22
Hermann 16
Hernried 5
Herter 17
Hessenberg 13
Hoernes 6
Hoffmann 9
Hofmann, H. 15
Hofmann, J. E. 12
Hofmann, W. 4
Hofstätter 4
Hofstaetter 7
Hoheisel 13
Hohenleutner 6
Huber 17
Humburg 19
Huttenlocher 18

Jacob 6
Jaeckel 17
Jaeger 10
Jahr 15
Jander 15
Jantzen 7
Jaspers 3
Jiriczek 7
Jung 4
Jungbluth 21

Kaestner 17
Kalitsunakis 9
Kamke 13
Kesselring 19
Kirn 5
Kleinlogel 22
Klemm 15
Klobe 12
Klug 16
Kneser 13
Knopp 13
Koch 3
König 14
Körting 23
Kolb 7
Koller 16
Kolms 10
Koschmieder 14
Krahe 8
Kranefeldt 4
Kresze 15
Kropp 3
Krug 10
Krull 12
Kuckuck 17
Küchler 21
Kümmel 4
Kutzelnigg 16

Landmann 3
Langosch 7
Lau 4
Lausberg 9
Lechner 20
Lehmann, G. 3
Lehmann, G. 22
Lehnert 8
Leisegang 3
Lengerken, von 17
Liebich 9
Lietzmann 5
Lockemann 15
Löbell 13
Lorenzen 12 3,
Lotze 18
Ludin 21
Ludz 3
Lüdemann 17

Mahler 15
Matthes 20
Mattick 16
Maurer 7
Mayrhofer 9
Megede, zur 19
Meiners 19
Meinke 19
Meissner 8
Mellerowicz 10
Meyer 9
Meysenbug 20
Mitzka 7
Moede 4, 11
Mohr 19
Moser 5
Müller, G. 7
Müller, H. R. 20
Müller, W. 19, 20
Münch 17
Mutschmann 8

Nagel 4
Naumann 7, 8
Neger 17
Nestle 9
Nicolas 11, 14
Niese 21
Noyer-Weidner 8

Oehlmann 5
Ohm 10
Onasch 4

Päsler 14
Paulsen 10
Pepping 5
Pfanzagl 11
Philipsborn 18
Pirani 19
Preller 6
Putz 19

Ramdohr 18
Ranke 8
Reichenow 17
Ringleb 12
Rohrbach 12
Roth 15
Rothe 13
Rumpf 5
Runge 19

Sauter 15
Schäfer 19
Scharrer 18
Scheer 15
Scheurig 5
Schilling 3
Schirmer 7
Schlenk 15
Schlingloff 4
Schmidt 23
Schoeneberg 12
Scholz 12
Schubel 8
Schubert, H. 12
Schubert, K. 5
Schulze, E. 19
Schulze, W. 15
Schwaiger 19
Schwartz 16
Sedlaczek 20
Seidel 17
Simmel 3
Sperber 7
Steinmetz 9
Stolberg-Wernigerode, zu 7
Stolz 9
Strubecker 13
Stuloff 12
Stupperich 4

Tafel 21
Teichmann 22
Thum 20
Tochtermann 20
Tölke 21
Treue 6
Troche 22

Unger 19

Valentiner 14
Vasmer 9
Vetter 15
Viëtor 7
Vogel 18
Vossler 8.

Waltershausen, v. 5
Weden 6
Weigert 5
Weimer 4
Wendland 4
Wendt 10
Wickop 23
Wiese, von 4
Wiesenewsky 19
Wisniewski 7, 8
Witting 13

Zietemann 21
Zipperer 20

GJG